

永續混凝土材料之實驗開發與應用研究

內政部建築研究所委託研究報告

中華民國 100 年 12 月

(本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見)

(國科會 GRB 編號)

PG10001-0234

(本部計畫編號)

100301070000G1026

永續混凝土材料之實驗開發與應用研究

受委託者：國立臺灣海洋大學

研究主持人：黃 然

協同主持人：陳君弢

研 究 員：張建智

研究助理：蔡嘉榮

內政部建築研究所委託研究報告

中華民國 100 年 12 月

(本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見)

目次

表次.....	III
圖次.....	VII
摘要.....	XIII
第一章 緒 論	1
第一節 研究緣起與背景	1
第二節 研究目的與範圍	2
第三節 研究方法	2
第二章 文獻回顧	5
第一節 混凝土材料與永續發展相關性	5
第二節 生命週期評估(Life cycle Assessment, LCA)	10
第三節 綠色或永續混凝土相關研究	15
第四節 再生材料在混凝土上之應用	16
第三章 永續混凝土定義、內涵及應用範圍	21
第一節 永續混凝土定義與內涵	21
第二節 永續混凝土應用範圍	22
第四章 問卷調查與專家座談	25
第一節 層級分析法(Analytical Hierarchy Process, AHP)	25
第二節 問卷設計	26
第三節 問卷調查與結果分析	31

第五章 試驗計畫及結果討論	33
第一節 低碳混凝土	33
第二節 熱傳導改良混凝土	41
第三節 耐久混凝土	63
第四節 符合暴雨管理透水混凝土	71
第五節 使用廢棄物、工業副產物或再生粒料的混凝土	77
第六節 小結	80
第六章 永續混凝土生命週期評估	81
第一節 生命週期評估軟體	81
第二節 永續混凝土生命週期評估案例分析	84
第三節 綜合討論與小結	91
第七章 結論與建議	93
第一節 結論	93
第二節 建議	93
附錄一 期初審查會議意見與回應	95
附錄二 期中審查會議意見與回應	99
附錄三 期末審查會議意見與回應	105
參考書目	1077

表次

表 2-1 臺灣能源使用二氧化碳排放量 ^[3]	9
表 4-1 材料因素	27
表 4-2 環境因素	27
表 4-3 因素相對重要性勾選範例	28
表 4-4 材料因素與環境因素相對重要性勾選表	28
表 4-5 材料因素相對重要性勾選表	29
表 4-6 環境因素相對重要性勾選表	30
表 5-1 粗粒料篩分析	34
表 5-2 細粒料篩分析	35
表 5-3 膠結材料化學成分	35
表 5-4 膠結料物理性質	36
表 5-5 NaOH 化學成分	36
表 5-6 Na ₂ SiO ₃ 化學成分	37
表 5-7 H ₃ PO ₄ 化學成分	37
表 5-8 低碳混凝土配比 (kg/m ³)	39
表 5-9 低碳混凝土抗壓強度試驗結果(MPa).....	39
表 5-10 低碳混凝土組成材料概估價格(NT\$).....	41
表 5-11 熱傳導改良混凝土配比(kg/m ³)	43
表 5-12 混凝土單位體積重(kg/m ³).....	44

表 5-13 熱傳導改良混凝土抗壓強度試驗結果(MPa).....	44
表 5-14 熱傳導改良混凝土熱傳導係數試驗結果(W/m.K)	47
表 5-15 矽藻土元素分析(EDS).....	49
表 5-16 蒙脫土元素分析(EDS).....	51
表 5-17 海泡石元素分析(EDS).....	52
表 5-18 沸石元素分析(EDS).....	53
表 5-19 調濕混凝土配比(kg/m ³)	55
表 5-20 飽和鹽類及相對濕度.....	56
表 5-21 調濕混凝土抗壓強度(MPa)	58
表 5-22 調濕混凝土吸濕試驗結果	60
表 5-23 調濕混凝土放濕試驗結果	62
表 5-24 耐久混凝土配比(kg/m ³)	65
表 5-25 耐久混凝土抗壓強度的試驗結果(MPa).....	67
表 5-26 累積通過電量對氯離子穿透指標評估表	70
表 5-27 混凝土氯離子穿透指標	71
表 5-28 台北雨量站不同降雨延時及頻率 (次/年) 下設計暴雨強度 ^[68, 69]	74
表 5-29 透水混凝土配比(kg/m ³)	75
表 5-30 再生粒料混凝土配比(kg/m ³)	78
表 5-31 再生粒料混凝土抗壓強度試驗結果(MPa).....	79
表 6-1 生命週期評估軟體特性	82

表 6-2	生命週期評估軟體差異 ^[75]	83
表 6-3	混凝土組成材料能源消耗	87
表 6-4	生產 1 公噸水泥所需的原料(公噸)	87
表 6-5	混凝土組成材料碳排放量(公噸)	88
表 6-6	1m ³ 混凝土碳排放量	89

圖次

圖 1-1 研究流程圖	3
圖 2-1 生命週期評估範圍	5
圖 2-2 水泥製造的高溫反應及燒結生成物示意圖	6
圖 2-3 大氣中二氧化碳濃度成長趨勢圖(0~2005 年) ^[18]	8
圖 2-4 全球二氧化碳排放分佈圖(藍色表是高排放量)	9
圖 2-5 生命週期評估步驟 ^[25]	12
圖 2-6 盤查分析架構 ^[25]	13
圖 2-7 生命週期衝擊分析架構 ^[26]	14
圖 2-8 闡釋過程架構 ^[27]	15
圖 4-1 層級分析法架構 ^[62]	25
圖 4-2 AHP 決策問題分析流程	26
圖 4-3 永續混凝土材料評估架構	26
圖 4-4 永續混凝土材料權重	31
圖 4-5 材料與環境因素權重	31
圖 5-1 水淬爐石粉末	37
圖 5-2 粉煤飛灰	37
圖 5-3 NaOH	38
圖 5-4 Na ₂ SiO ₃	38
圖 5-5 緩凝劑(H ₃ PO ₄)	38

圖 5-6 低碳混凝土抗壓強度	40
圖 5-7 低碳混凝土概估價格(NT\$).....	41
圖 5-8 輕質粒料	42
圖 5-9 陶瓷粒料	42
圖 5-10 熱傳導改良混凝土抗壓強度	45
圖 5-11 陶瓷粗粒料混凝土抗壓強度	46
圖 5-12 輕質粗粒料混凝土抗壓強度	46
圖 5-13 熱傳導改良混凝土熱傳導係數	47
圖 5-14 不同養護齡期混凝土熱傳導係數	48
圖 5-15 混凝土熱傳導係數	48
圖 5-16 矽砂	49
圖 5-17 矽藻土粉末	50
圖 5-18 矽藻土微觀圖	50
圖 5-19 矽藻土成分分析	50
圖 5-20 蒙脫土粉末	51
圖 5-21 蒙脫土微觀圖	51
圖 5-22 蒙脫土成分分析	51
圖 5-23 海泡石粉末	52
圖 5-24 海泡石微觀圖	52
圖 5-25 海泡石成分分析	53

圖 5-26 沸石粉末	54
圖 5-27 沸石微觀圖	54
圖 5-28 沸石成分分析	54
圖 5-29 吸(放)濕試驗裝置	56
圖 5-30 掃瞄式電子顯微鏡(S-4800).....	57
圖 5-31 X 光繞射分析儀	58
圖 5-32 調濕混凝土抗壓強度	59
圖 5-33 調濕混凝土不同養護齡期抗壓強度	59
圖 5-34 調濕混凝土養護 28 天後的抗壓強度	60
圖 5-35 含濕率(吸濕)與相對濕度(RH)的關係	61
圖 5-36 調濕混凝土在相對溼度 69% 環境下的含濕率	61
圖 5-37 含濕率(吸濕)與相對濕度(RH)的關係	62
圖 5-38 調濕混凝土在相對溼度 33% 環境下的含濕率	63
圖 5-39 不同燒結溫度的稻殼灰	64
圖 5-40 RCPT 試驗裝置	66
圖 5-41 不同養護齡期下的抗壓強度(水膠比 0.65)	67
圖 5-42 不同養護齡期下的抗壓強度(水膠比 0.35)	67
圖 5-43 累積通過電量與通電時間關係圖(水膠比 0.35)	68
圖 5-44 累積通過電量與通電時間關係圖((水膠比 0.65).....	68
圖 5-45 不同水膠比 6 小時累積總通電量	69

圖 5-46 6 小時累積總電量(水膠比 0.35)	69
圖 5-47 6 小時累積總電量(水膠比 0.65)	70
圖 5-48 耐久混凝土 6 小時累積總電量	71
圖 5-49 天然粒料	72
圖 5-50 電弧爐渣	72
圖 5-51 透水係數試驗裝置	73
圖 5-52 人工降雨模擬器示意圖	74
圖 5-53 養護 28 天透水混凝土抗壓強度試驗結果	75
圖 5-54 漿體填充粒料孔隙率與抗壓強度關係	76
圖 5-55 透水係數試驗結果	76
圖 5-56 漿體填充孔隙率與透水係數關係	77
圖 5-57 再生混凝土粗粒料	78
圖 5-58 再生粒料混凝土抗壓強度	79
圖 5-59 再生粒料混凝土抗壓強度與養護齡期關係	80
圖 5-60 養護 28 天再生粒料混凝土抗壓強度	80
圖 6-1 水泥生產流程	85
圖 6-2 飛灰產產出流程	86
圖 6-3 水淬高爐石粉產出流程	86
圖 6-4 混凝土組成材料碳排放量計算特徵化結果(IPCC 模式)	88
圖 6-5 低碳混凝土碳排放量計算特徵化結果(IPCC 模式)	89

圖 6-6 低碳混凝土對環境衝擊特徵化結果(Eco-Indicator95 模式)90

圖 6-7 低碳混凝土對溫室效應之影響特徵化結果(Eco-Indicator95 模式)90

圖 6-8 粉煤飛灰添加量對溫室效應之影響標準化結果(Eco-Indicator95 模式)91

圖 6-9 水淬高爐石粉添加量對溫室效應之影響標準化結果(Eco-Indicator95 模式)
.....91

圖 6-10 抗壓強度、生產成本及碳排放量關係圖91

摘要

關鍵詞：永續混凝土(綠色混凝土)、環境、生命週期評估

一、研究緣起

混凝土是目前世界上使用最廣泛的營建材料之一，2009 年世界永續發展商會報告中指出全世界每年混凝土的使用量超過 250 億噸，並且有持續增加的趨勢。所以應該審慎的使用混凝土或改進混凝土製作技術，方能有助於達成世界永續發展的目標。永續混凝土或稱綠色混凝土的研發主要以混凝土結構物的全生命週期為考量，藉由創新混凝土技術的開發，達到節能減碳的目標，以建造符合永續發展的結構物。未來的混凝土不僅需滿足強度與耐久性的要求，更要符合節約能源、保護環境永續發展的需求。目前「綠建築」、「永續性」與「永續發展」並無全球共同普遍被接受的定義。一般認為「永續發展」係指為滿足這一代需要所進行的各項活動，不應影響後世代滿足其發展各項需求的能力。永續發展涵括環境議題、社會議題與經濟議題三大範疇。本計劃中的永續混凝土係指使用於永續結構物上，利用生命週期評估概念所設計與使用的混凝土。

二、研究內容

本計畫將永續混凝土概分成六大類：(1)低碳混凝土(特別是水泥生產技術的改進)；(2)改良熱傳導混凝土；(3)改良熱質、儲熱混凝土；(4)耐久混凝土；(5)符合暴雨管理的透水混凝土及(6)改善人居環境的混凝土及使用廢棄物、工業副產物或再生材料混凝土。本計畫主要的研究目標為探討如何降低混凝土對整體環境的影響。混凝土具有可塑性、低成本、能抵抗惡劣暴露環境、高強度與高熱質等特性，因此適合作為永續結構的主要組成材料，雖然永續結構物的建造不是由單一材料的改良使用就可以達成，然而混凝土可經由預鑄構件的使用，膠結料使用量的降低及再生材料的使用來逐步達到永續結構物的要求目標。本計劃係利用模式推演及材料試驗，探討永續混凝土的組成參數與評估指標。

三、重大發現

本計畫參照美國混凝土學會(ACI)定義的永續混凝土的類別，分別敘明其應用範圍，並經由試驗計畫，進行相關的配比與試體製作，獲致評估永續混凝土所需的數據，

以實做方式來說明評估法。另外使用生命週期評估法，評估材料的改善對降低衝擊環境的效益。研究成果，對未來永續混凝土技術及應用手冊的研擬應有助益。

四、主要建議事項

立即可行之建議

主辦機關：內政部營建署

協辦機關：內政部建研所或相關部會

使用摻料或其他替代水泥材料對混凝土的性能、成本及環境的衝擊影響程度甚大，因此建議未來能夠針對混凝土，摻料的成本及其對環境衝擊，進行完整系列的調查與分析，並建議訂定永續混凝土技術及應用手冊以供工程界參考，達到推動政策的目標。

長期性之建議

主辦機關：內政部營建署

協辦機關：內政部建研所或相關部會

永續混凝土材料參數、評估模式及相關資料庫的建議，可以經由持續研究計劃的執行而能更臻完備與普遍應用性。

ABSTRACT

Key Words : Sustainable Concrete, Environment, Life Cycle Assessment

1. Background

Concrete is one of the widely-used construction materials in the world. It has been reported that the consumption of concrete has been reached 25 billion tons per year and is still increasing nowadays. Therefore, the use of concrete should be restricted or the concrete producing technique should be improved in order to have a sustainable society. Sustainable concrete is associated with the life cycle of a structure. Advanced concrete producing techniques would help to build a sustainable building. Therefore, future concrete production should meet the durability and energy-saving requirement. Although the terms of ‘green structure’, ‘sustainability’, and ‘sustainable development’ are not well defined nowadays, people generally agree that a sustainable development should not deprive the ability of the future generation to acquire their needs, and so the sustainable development should cover issues on environment, society, and economy. The sustainable concrete defined in this study is expected to be used for sustainable structures and be evaluated by the life cycle cost.

2. Research Content

Sustainable concrete can be classified as: low-carbon concrete (produced by new producing technique), thermally insulated concrete with reduced thermal conductivity and good energy storage, durable concrete, and pervious concrete. Since concrete is easy-made, low-cost, durable, stiff, and thermally insulated, it is adequate to be the main component of a sustainable structure. This study plans to explore the mix design and indices of the sustainable concrete through a series of modeling and experiments.

Obtained results are summarized as follows:

1. Indices of sustainable concrete are collected from domestic and foreign literature.
2. The term ‘sustainable concrete’ is defined and its relationship with ‘sustainable structure’ is established using life cycle cost.
3. The materials parameters, indices, ways of applying sustainable concrete in Taiwan are

defined.

4. Strategies of sustainable developments proposed by the government are realized by the sustainable concrete.
5. The quality of infrastructure construction is improved and the government efficiency is increased.

第一章 緒 論

第一節 研究緣起與背景

1997 年制定的京都議定書(Kyoto Protocol)中針對二氧化碳排放量議題，訂定目標為於 2012 年之前，部份國家應控制二氧化碳的排放量比 1990 年的排放量降低 1 ~ 8 %^[1]。然而，台灣從 1990 年至今二氧化碳排放量卻大幅增加 120 %，過去十年的年平均增加率高達 6 % 以上^[2]，且根據經濟部統計，2006 年台灣每人平均年排放二氧化碳的等溫室氣體量約 11.3 噸，全台總排放量已達 2.5 億公噸以上，國內溫室氣體排放量約佔全球總排放量 1%，居亞洲之冠^[3]。各產業如何減少國內溫室氣體的排放量，實乃當前重要的研究課題之一。

國際間倡議建立碳排放權的交易制度，議定書簽約國彼此間可以進行排放權的交易，碳排放權不足的國家可向超額碳排放權的國家買進排放權。非簽約國家，雖未被議定書規範，但進入他國市場進行貿易時，必須符合該國提出的綠色生產要求條件，否則可能會發生增加關稅或限量輸入等情事^[1]。碳排放權交易機制會直接衝擊各國能源配置及相關產業結構，進而影響該國經濟發展，所以，二氧化碳排放權勢必會成為各國未來最珍貴的經濟資產。

由於近一世紀世界經濟與科技的蓬勃發展以及人類生活需求慾望不斷提升，導致地球資源逐漸耗竭及生態環境的快速惡化，長年累積的工業廢棄物，逐漸擴散污染到人居環境，影響居民健康。在全球環境惡化速度無法有效地降低的情況下，興起了人類對工業、經濟、環境及資源有關永續發展的概念，由此並衍生了與永續發展相關的綠色技術，主要類別可概分為產品綠色技術、製程綠色技術、產品使用端綠色技術及產品廢棄後資源化技術等^[4]。1992 年，日本學者山田良一，在研究既有材料與環境間關係時，首次提出了環境材料或生態材料(Environment Conscious Materials 簡稱 Eco-materials)的概念，並創建環境意識材料(Environmentally Conscious Materials)、生態材料(Ecological Materials)、經濟材料(Economical Materials)、環境協調性產品以及符合環境協調性設計(Eco-design)等一系列詞語，受到世界各國材料界積極回應^[5]。一般而言，已開發或研發中的生態環境材料至少須滿足下述的一種(或以上)特點：(1)優異的使用性能，這是與傳統材料一致的地方，稱之為材料

的先進性；(2)需掌握材料的生產環節，減少資源和能源的消耗，製程中有害排放少，廢棄後易於再生循環，即材料在製備、流通、使用和廢棄的全過程中必須保持與地球生態環境的協調性；(3)材料的感官性質，要求對材料的感覺舒服，使用者樂於採用，這可視為材料的舒適性。

本計畫依據回收、再利用、永續發展與節能減碳等綠色及永續概念，以環境材料三方面的特性包括先進性、環境協調性、舒適性為出發點，擬選擇飛灰、稻殼灰、水淬高爐石粉等副產品作為水泥基材改質與替代材料來製作永續混凝土，進行系列性質試驗以驗證其使用性能是否優於一般混凝土，再利用生命週期評估(Life Cycle Assessment, LCA)方法，評估材料由生產至廢棄再生利用的過程中對環境之衝擊性。

第二節 研究目的與範圍

環境汙染與資源耗竭的問題日趨嚴重，尋求解決之道迫在眉梢，永續混凝土(綠色混凝土)為新世紀混凝土材料開發重點之一，本計畫透過材料的基本資料調查及彙整，利用生命週期評估法，分析材料從搖籃至墳墓過程中對環境衝擊之影響，並透過試驗加以驗證其組成或特性是否與永續混凝土符合，研究目的概列如下：

1. 蒐集分析國內外與永續混凝土相關文獻及評估方法。
2. 研訂永續混凝土內涵與利用生命週期評估法，釐清永續結構物與永續混凝土的關連性。
3. 研訂台灣永續混凝土組成材料的參數、評估指標與應用範圍。
4. 永續混凝土的研發及資源充分利用，符合政府永續發展之策略目標。
5. 除培育相關研發人才外，本計劃可增進公共工程品質與政府施政效能。

第三節 研究方法

1-3-1 研究方法與流程

本計畫初步蒐集國內外永續混凝土相關文獻，彙整並進行專家座談建立評

估指標與權重，同時應用 SimaPro 軟體估算產品在生產過程碳排放量等，另外選擇飛灰、稻殼灰、爐石及再生粒料等做為混凝土中的膠結料或填充料製作試體，參考 CNS、ASTM、JIS 等規範進行新拌性質、力學性質、耐久性性質、及其他性質試驗(依功能需求定之)等試驗。最後綜合前述之調查、分析及試驗結果進行討論並提出結論與建議，如圖 1-1 研究流程圖所示。

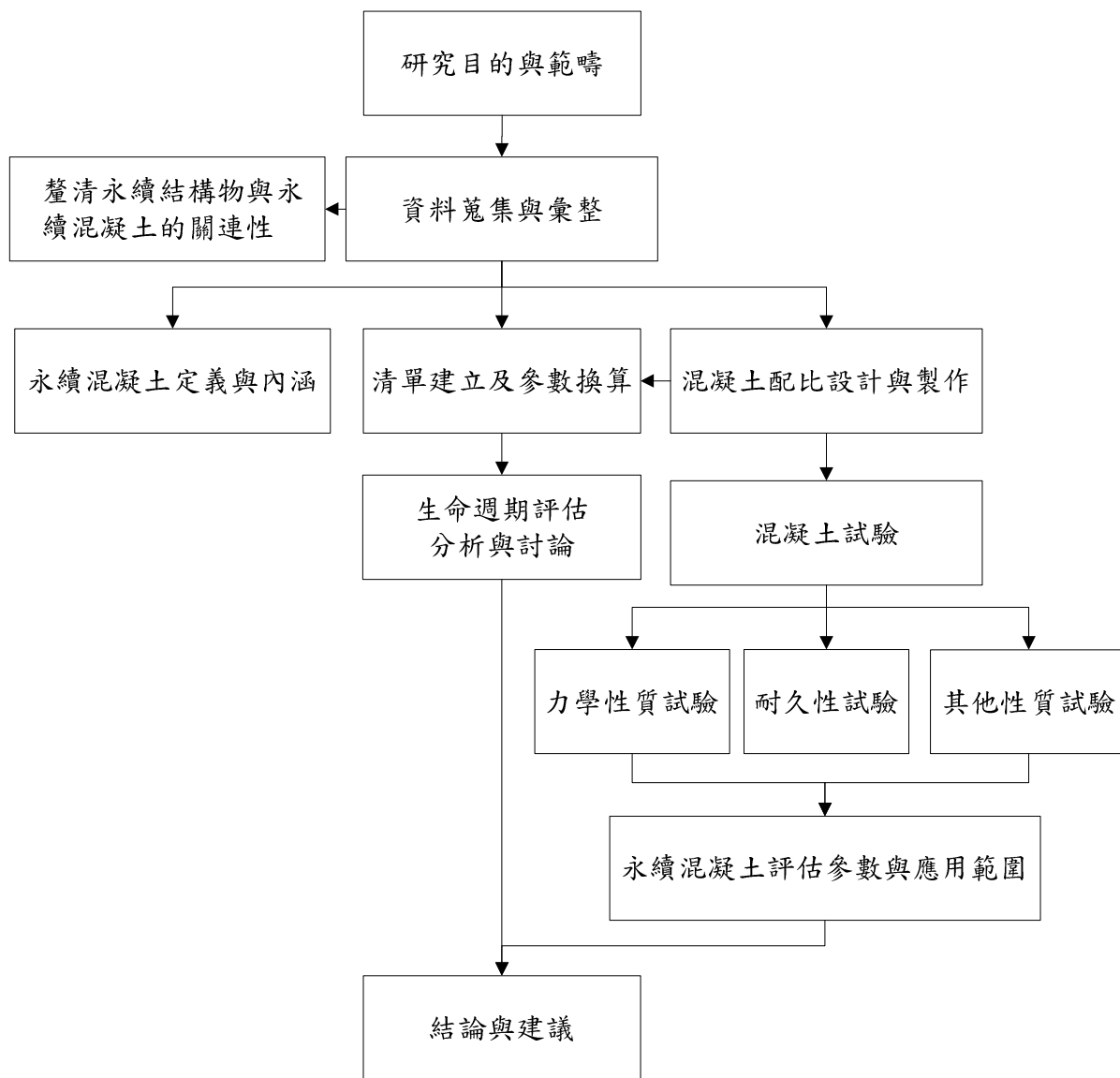


圖 1-1 研究流程圖

(資料來源：本研究整理)

第二章 文獻回顧

第一節 混凝土材料與永續發展相關性

2-1-1 碳足跡

碳足跡(carbon footprint)概念最早源自於生態足跡，目的在於估算每人每日生活所需的消費與服務需要多大的生態系面積支持^[6]。依據環保署的定義，碳足跡係指產品、服務或某事件在生命週期中，釋放或累積於全球的所有溫室氣體排放量^[7]。混凝土的碳足跡計算可藉由生命週期評估進行。生命週期評估主要係評估產品在整個生命週期中對環境造成的影響，包含製程中初期的開採、處理、運輸和接續至產品使用、再生利用、維護、回收與再利用到最後的拋棄等過程。生命週期評估涵蓋範圍如圖 2-1 所示^[8]。

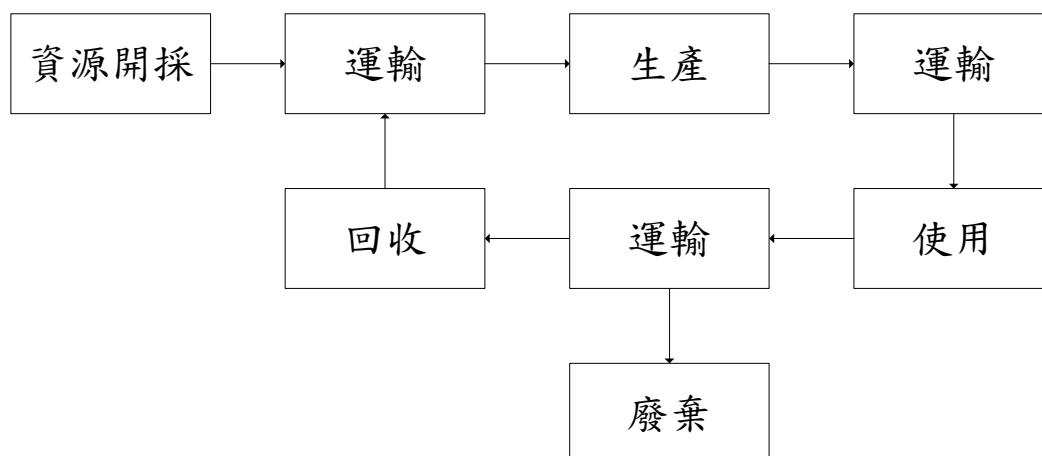


圖 2-1 生命週期評估範圍

(本研究整理)

舉例來說，衣服製作與使用過程中主要的二氧化碳排放在於生產及原料與成品製作及運輸等過程，衣服的洗滌會消耗能源，也會產生額外的二氧化碳排放^[9]。對於混凝土產品而言，生命週期排放可分為兩種：一種是直接排放，如施工期間所產生二氧化碳排放；另一種則是間接，如建築物使用上的能源損耗及產生的二氧化碳排放。通常建築物在生命週期過程中使用階段所產生的二氧化碳排量大大於施工過程中產生的二氧化碳排放量^[10]。

混凝土是目前世界上最廣泛使用之營建材料之一，可充分地滿足人們生活需求，但混凝土主要的膠結料是卜特蘭水泥，而卜特蘭水泥在整個生命週期過程中會對環境

造成嚴重的衝擊。卜特蘭水泥的原料需要開採大量的礦物資源，生產過程中要經過高溫燒結，需要消耗大量的煤、油等能源，同時生產過程中可能會造成環境污染，如排放大量的二氧化碳、有害氣體及高溫廢水等，長期而延，可能使森林、河川、海岸珊瑚礁、農作物等受到一定程度的傷害，也會影響到人和其他生物的健康。

2-1-2 卜特蘭水泥生產的二氧化碳排放

卜特蘭水泥生產過程中直接產生的二氧化碳，大約有二分之一來自於燒結過程中燃燒煤或其它化石燃料，另一半產出至於原料煅燒過程中如碳酸鈣(CaCO₃)在水泥窯中加熱形成石灰時所生產的二氧化碳。水泥窯中的石灰、石英、鋁與原料中所含的氧化鐵燒結後生成熟料，熟料是半成品，必須要研磨並和少量的石膏與/或硬石膏混合，才完成卜特蘭水泥的製作^[11]。

當水泥製造原料溫度在 50°C ~ 600°C 時，原料中的水開始蒸發產生自由水，溫度約達 600°C 時黏土開始產生分解，溫度達約 600 ~ 800°C 時碳酸鈣(CaCO₃)會分解成氧化鈣(CaO)及二氧化碳(CO₂)，再經由各階段溫度的變化而形成各種化合物，如矽酸二鈣(C₂S)及矽酸三鈣(C₃S)，最後完成初步水泥熟料的製作^[12]，詳如圖 2-2，化學式如公式 2-1, 2-2 所示。

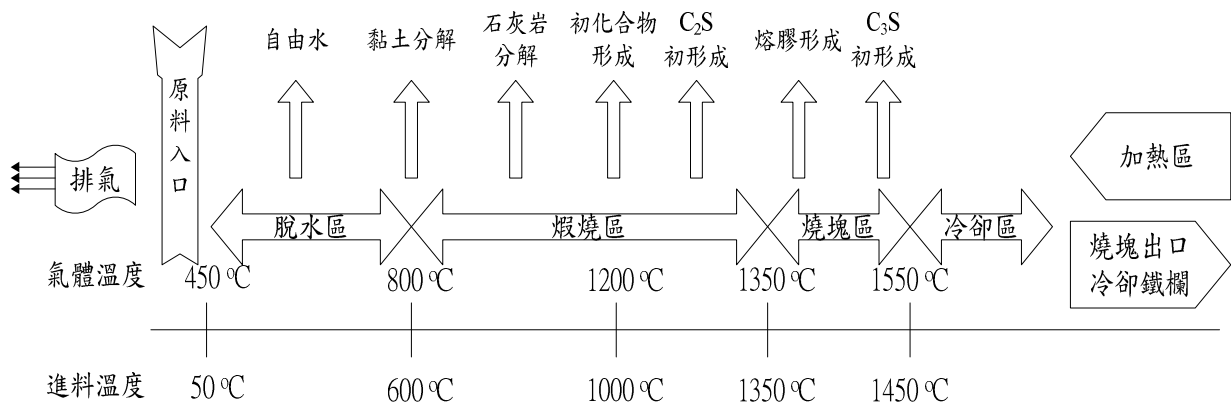
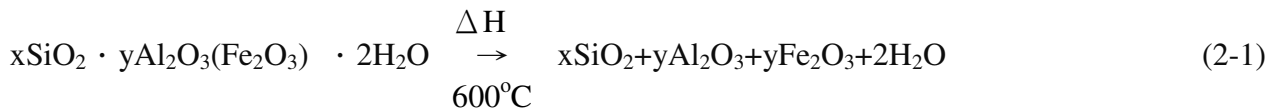


圖 2-2 水泥製造的高溫反應及燒結生成物示意圖

(本研究整理)

經濟部工業局所出版的溫室氣體盤查減量宣導手冊提到，水泥生產過程中的二氧化碳排放量可參考美國環保署 (Environmental Protection Agency, EPA) 提出的 Climate Wiser 計畫中所建議的水泥產量估算法，據此計算得知平均每生產 1 公噸的水泥約產生 0.7 ~ 1 公噸的二氧化碳氣體，計算方式如式 2-3 所示^[13, 14]：

$$\text{二氧化碳排放量} = \text{水泥生產} \times \text{熟料對水泥比率} \times \text{原物料比率} \times \text{CaCO}_3 \text{當量} \times \text{二氧化碳對碳酸鈣的計算比率} \quad (2-3)$$

式中：

水泥產量：水泥生產總量(公噸)

熟料與水泥比率：水泥熟料成分(%), 如為 100 % 卜特蘭水泥產出內設值為 95 %，若為混合與/或砌築水泥則內設值為 75%

原料比率：每公噸熟料中使用的原料公噸數(公噸原料/公噸熟料)一般內設值為 1.54

CaCO₃ 當量：原料中的石灰成分(%)內設值為 78%

大氣中二氧化碳濃度的增加是導致地球溫室效應 (greenhouse effect) 的重要原因，2009 永續發展世界商會的報告即指出，每年全世界混凝土使用量超過 250 億噸^[9]，混凝土組成材料中水泥的二氧化碳排放量佔世界的 5 ~ 7%^[15, 16]，已經遠超過其它組成材料。隨著人口數的激增，各種物質需求持續增加，故總二氧化碳排放量仍將繼續增加，但若沿著碳足跡尋找影響因子，或許能找到減低環境衝擊的最佳方案與評估指標。

2-1-3 二氧化碳排放的影響

如前文敘述，二氧化碳是造成目前全球暖化(溫室效應)與臭氧層破洞的原兇之一。溫室效應氣體泛指大氣中促成溫室效應的氣體成分，自然溫室氣體包括水氣 (H₂O)，所產生的溫室效應大約佔整體溫室效應的 60-70%，其次是二氧化碳 (CO₂) 大約佔 26%，其它還有臭氧 (O₃)、甲烷 (CH₄)、氧化亞氮 (又稱笑氣，N₂O) 以及人造溫室氣體如氯氟碳化物 (CFCs)、全氟碳化物 (PFCs)、氫氟碳化物 (HFCs)，含氯氟烴 (HCFCs) 及六氟化硫 (SF₆) 等^[17]。依照聯合國氣候變化框架公約的定義，所謂溫室氣體大致可分為，二氧化碳 (CO₂)、甲烷 (CH₄)、氧化亞氮 (N₂O)、全氟碳化物 (PFCs)、氫氟碳化物 (HFCs)，含氯氟烴 (HCFCs) 及六氟化硫 (SF₆) 等六種。

十八世紀末葉工業革命，帶動世界各地經濟快速成長，以致於地球的各项資源大量被開發使用，同時產生大量的廢棄物及溫室氣體排放，並有逐年增加的現象。科技

進步快速大量使用資源的最終結果，將面臨資源短缺及環境污染的嚴重問題。其中，二氧化碳、甲烷及氧化亞氮的濃度年成長率更是驚人。圖 2-3 顯示 1800 年開始至 2005 年間，大氣中二氧化碳的濃度由 280 ppm 逐年升到 380 ppm，氧化亞氮由 250 ppb 升到 320 ppb，甲烷由 270ppb 升到 1900ppb^[18]。

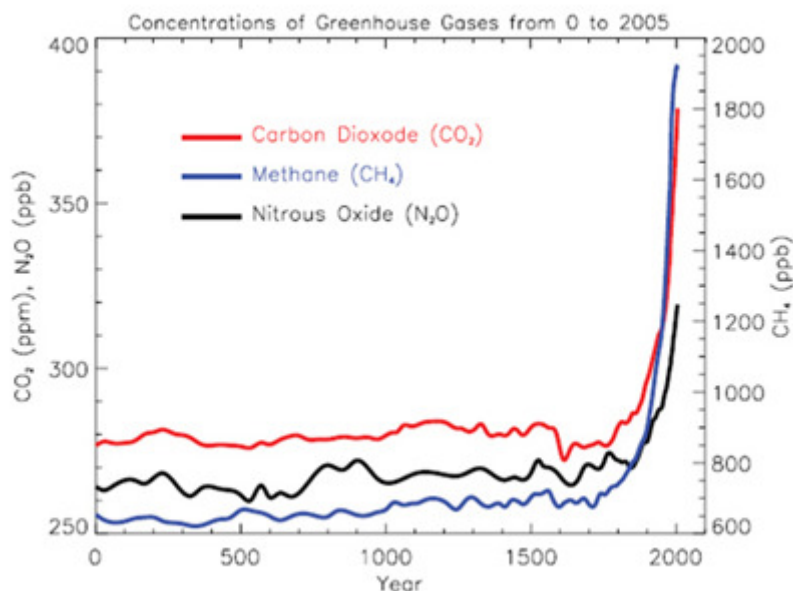


圖 2-3 大氣中二氧化碳濃度成長趨勢圖(0~2005 年)^[18]

(資料來源：Global Greenhouse Warming, 2010)

近年來國際間開始注意溫室效應的嚴重性，並於 1997 年 12 月在日本京都由聯合國氣候變化綱要公約參加國舉行三次會議擬訂京都議定書(Kyoto Protocol)，其設定目標為「將大氣中的溫室氣體含量降低穩定至一適當的水平，以防止劇烈的氣候改變對人類造成傷害」，期望部份國家於 2012 年前，能將二氧化碳的排放量控制在 1990 年排放量的 95 % 以下^[1]。

表 2-1 為臺灣能源使用二氧化碳排放量年統計表，雖然 2009 年相較於 2008 年二氧化碳的排放量已有些許改善，但由 1990 年至 2009 年間二氧化碳的排放量成長率約為 4.1%，亦即換算每人平均年排放成長率約為 3.4%。目前國內溫室氣體排放量佔全球總排放量近 1%，居亞洲之前幾名^[2,3]。

表 2-1 臺灣能源使用二氧化碳排放量^[3]

時間 (西元)	能源使用二氧化碳排放量 (千公噸)	時間 (西元)	能源使用二氧化碳排放量 (千公噸)
1990	110851	2000	215488
1991	119943	2001	219855
1992	128220	2002	227836
1993	137626	2003	237213
1994	145669	2004	245303
1995	153176	2005	251699
1996	161624	2006	259265
1997	174024	2007	262787
1998	185403	2008	255163
1999	195384	2009	239615

(資料來源：經濟部能源局，能源統計年報，2009)

圖 2-4 為全球二氧化碳排放分佈圖，由深(藍)至淺(綠)個別表示排放量。其中，排放量最嚴重的地區主要包括歐洲、北美洲各地、亞洲中國與台灣等已開發或開發中的國家或地區^[18]。

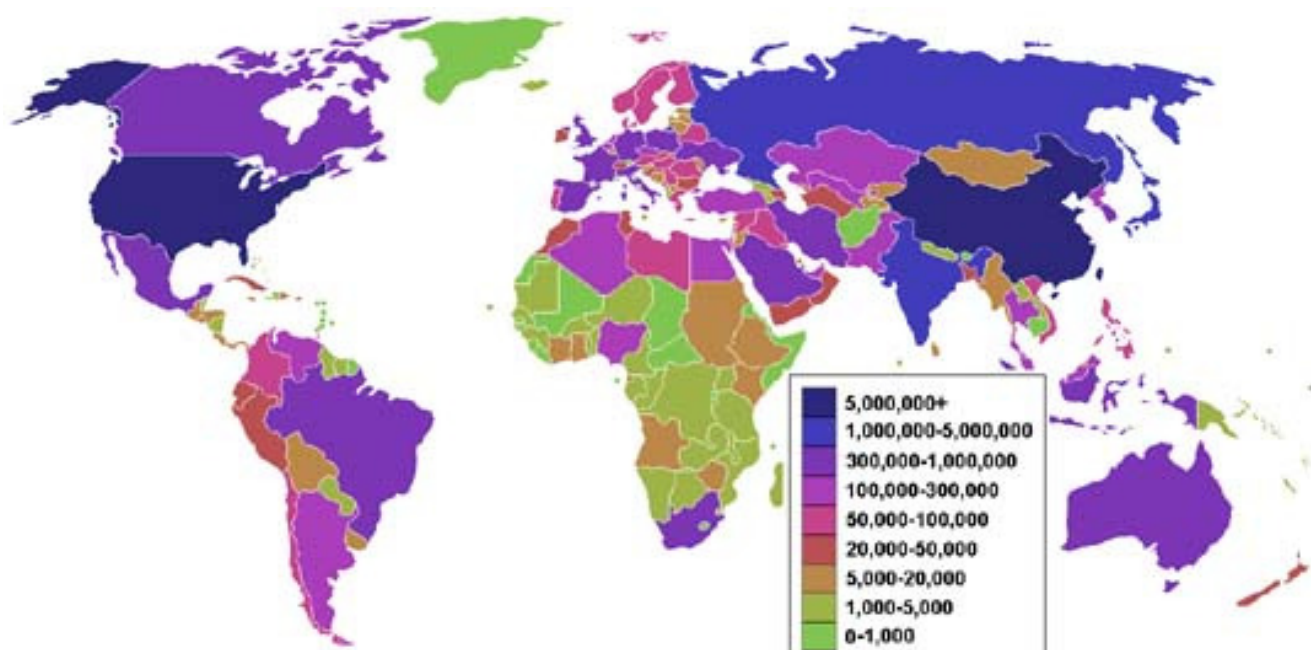


圖 2-4 全球二氧化碳排放分佈圖(藍色表是高排放量)

(資料來源：Global Greenhouse Warming, 2010)

京都議定書的簽約國彼此間可以進行碳排放權交易，不足碳排放權可由碳權超額的國家買進。非簽約國，雖然不需被強制規範，但進入他國市場貿易時可能必須接受

該國所提出的綠色生產要求^[1]。碳排放權交易機制將直接衝擊各國能源配比及產業結構，進而影響整體的經濟發展，因此二氧化碳排放權將成為未來最珍貴的經濟資源。

第二節 生命週期評估(Life cycle Assessment, LCA)

目前，許多產業開發新產品時已經開始藉由 LCA 具體量化評核產品在生產、使用、廢棄等階段中對環境所造成之影響。混凝土從原料開採、生產到廢棄材料的處理都和環境息息相關，因此永續混凝土的應用與試驗開發已成為營建業一個重要的考量因子。生命週期評估係指產品從搖籃至墳墓的環境衝擊評估方法，內容涵蓋產品生命週期的完整分析，包括原料的取得、生產、應用、拆除及棄置等階段，最後評估產品整個生命週期過程中對環境、生態及人體健康所帶來的正、負面衝擊^[19]。

1970 年起，美國、德國、英國、瑞士及瑞典等國紛紛興起有關產品自搖籃至墳墓的環境負研究。也許偏重研究方向不同，有部分針對汙染，有部分可能針對環境或能源的損耗，雖未能包含完整生命週期，但亦說明了生命週期評估已進入萌芽階段。1980 年末期，美國由於廢棄物產量不斷增加，促使各界普遍認定應管制可造成大量垃圾之產品，其管制的基準在於生命週期評估^[20]。1990 年，美國毒理及化學學會(SETC)開始舉辦生命週期技術研討會與培訓課程。於 1992 年，國際標準組織(ISO)正式成立技術委員會(TC 207)，針對 ISO 14000 環境管理系列標準建立環保相關作業及文件系統。該系統除了有相關可供依循的標準外，也對產品提供各項評估項目，當中的生命週期評估為產品評估的基礎方法，同時也將生命週期評估納入 ISO 14040 標準中^[21]。

2010 年歐洲曾有學者利用生命週期評估方法，來評估竹子作為結構構件對環境的影響，以經濟及實用性的觀點提出研究成果，說明竹子是非常具環境保育及經濟性的永續建築材料，報告中提出西歐國家針對竹子在營建業上的應用研究是具有前瞻性^[22]。同年，也有學者針對再生能源進行生命週期評估，研究方向主要著重於溫室氣體的排放量，內容分為靜態與動態的生命週期評估。研究結果顯示風力發電無論在滿足能源需求方面或降低空氣汙染排放方面皆有不錯表現。在環境衝擊部分，其對全球暖化趨勢、酸化與優養化問題影響較小^[23]。2008 年，Oyeshola 選擇泰國一個具指標性的商業大樓，依據 ISO14040 調查該大樓之生命週期，由材料製造、使用、維護至最後拆除等階段透過計算權重值，再利用生命週期評估每階段對環境的衝擊。研究結果發現鋼和混凝土這兩種建築材料影響環境最大，在製造階段分別占 24%和 47%全球暖化潛

值；總優養化形成潛值則分別占大約 41%和 30%；另外酸化潛值也分別占約 37%和 42%^[20]。

生命週期評估應用與 ISO14001 標準實施有著密切的關係。ISO14001 要求組織應建立程式以識別其活動、產品及服務中的環境因素與重大環境因素，並在制定目標指標時將，重大環境環境因素加以考慮，經由 LCA 全面性的調查與了解混凝土生產與轉化過程中的環境影響，這些環境影響不但包括各種廢料的排放，還涵蓋整個物料和能源的消耗以對環境造成的破壞作用。如此將污染控制與減少能源的消耗串連在一起，這樣既可以防止環境問題，從生命週期的某個階段轉移到另一個階段，或污染物從一個介質轉移到另一個介質。

2-2-1 生命週期評估架構：

根據 ISO14040(生命週期評估總則)，生命週期期評估架構須包含四個主要部分：ISO /FDIS 14041 目的與範疇界定、ISO /FDIS 14041 盤查分析、ISO/CD 14042 衝擊評估與 ISO/CD 14043 結果闡釋^[24]。

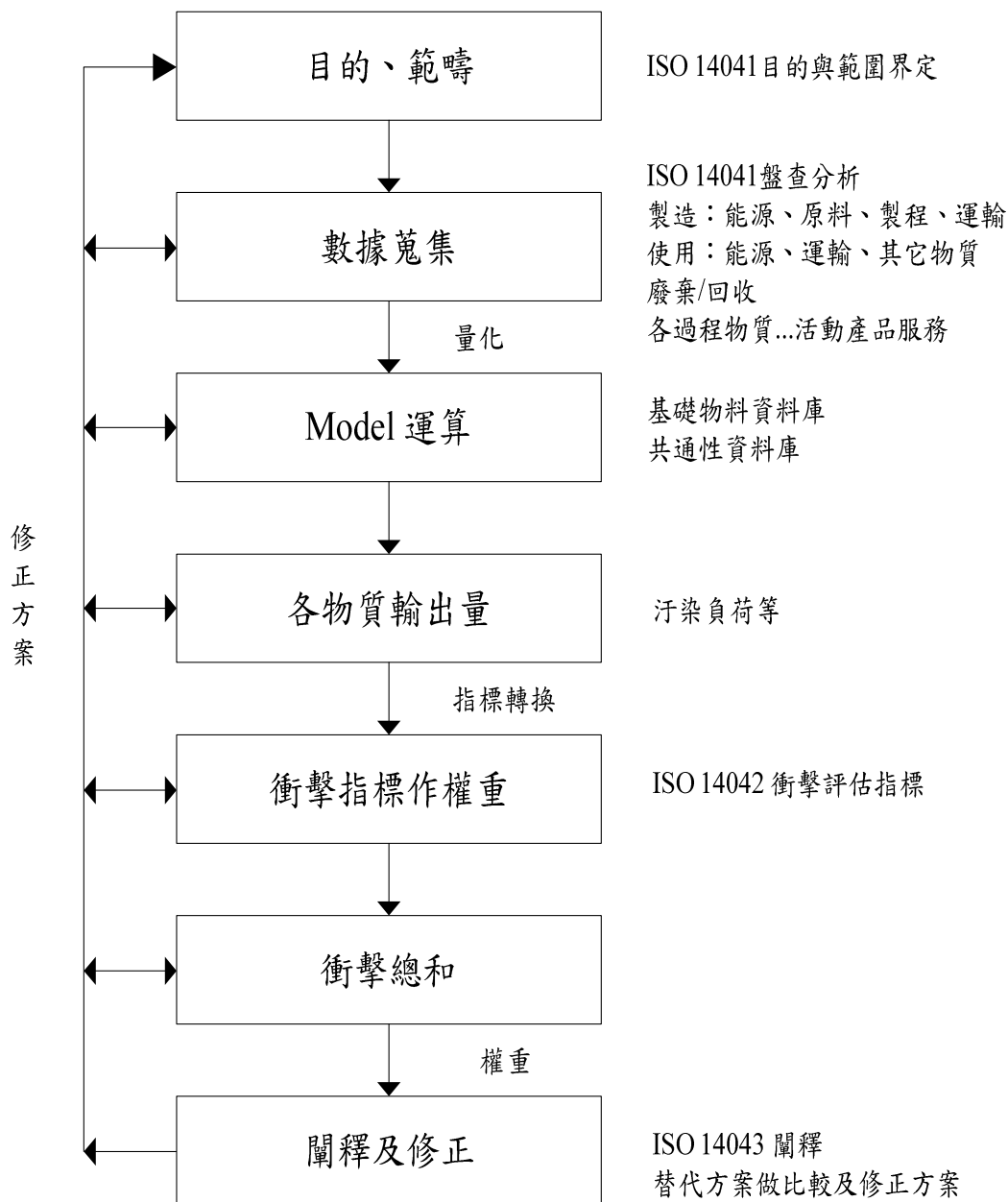


圖 2-5 生命週期評估步驟^[25]

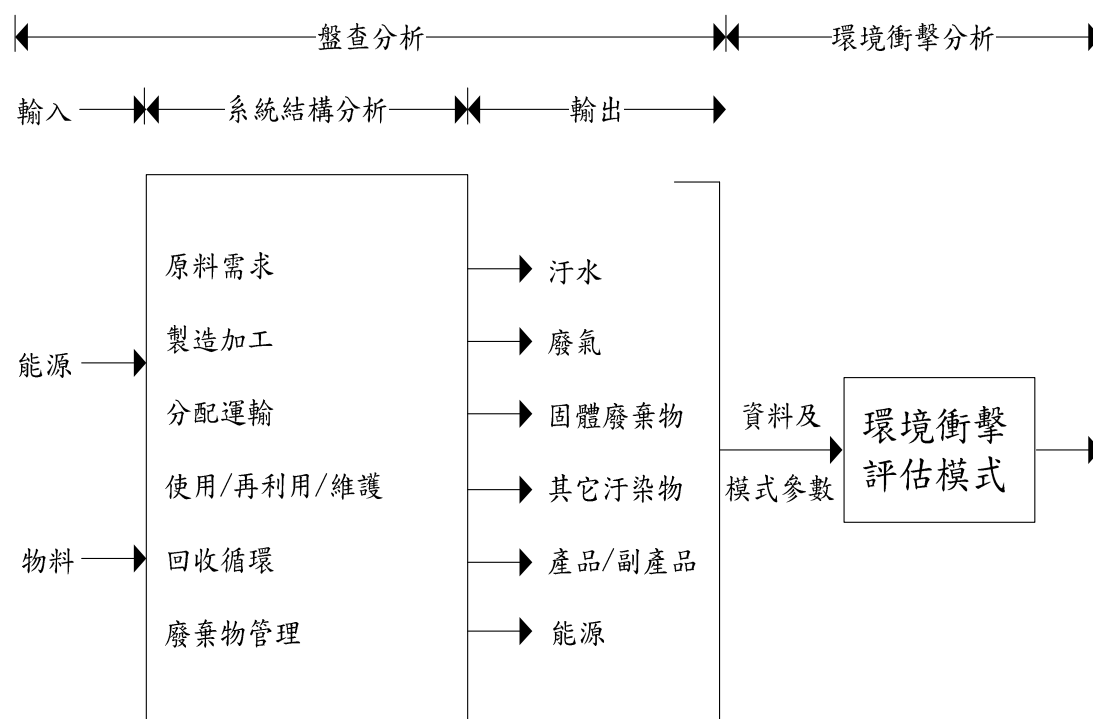
(資料來源：ISO /CNS 14041)

2-2-2 目標與範疇界定(Goal and Scope Definition)

生命週期評估過程中，目的與範疇之界定為系統作業一項整合的部分，當確立研究目的與範疇，即可進行相關資料盤查與蒐集，然後進行分析、轉換、連接及運算等。生命週期的評估通常需要考慮以下幾點：研究系統、系統界限、功能單位、衝擊評估的型態及範圍、數據採用之必要條件及假設條件、研究限制。在生命週期評估法中，最重要的關鍵在於清楚定義與描述該系統的功能，進而訂定該系統的單位功能。

2-2-3 盤查分析(Inventory Analysis)

此階段主要為相關資料蒐集及輸出、輸出量化工作。輸入資料包含了原料之資源的使用，輸出資料則為所生產的產品外，另外還包含廢棄物與環境衝擊等排放指數，而資料蒐集之範圍大小及細膩度，則依目的與範疇而定。此外，在此階段中所有投入、產出之數據均依照功能單位進行標準化(Normalization)，生命週期盤查分析架構，如圖 2-6 所示^[25]。

圖 2-6 盤查分析架構^[25]

(資料來源：ISO /CNS 14041)

2-2-4 衝擊評估(Impact Assessment)：

生命週期衝擊評估是由盤查分析提供數據，在依盤查項目對環境影響參考因子所佔比例，量化加總轉化成實際或可能行程對環境造成衝擊之指數，生命週期衝擊分析架構，如圖 2-7 所示^[26]。

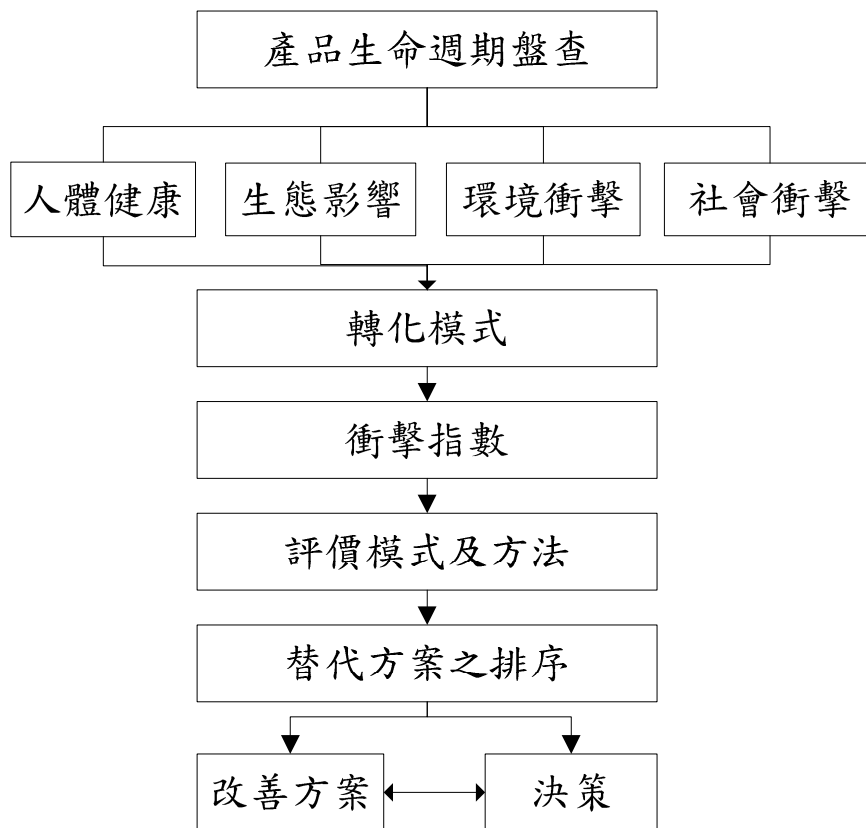
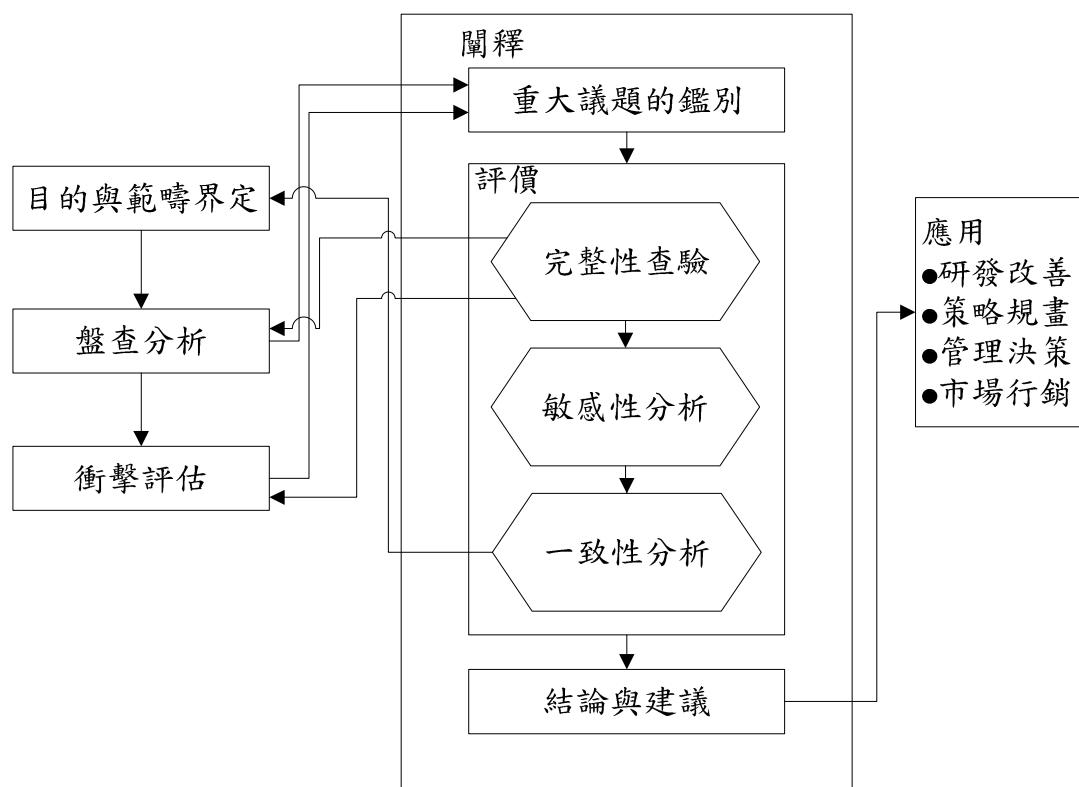


圖 2-7 生命週期衝擊分析架構^[26]

(資料來源：ISO /CNS 14042)

結果闡釋 (Interpretation)

闡釋是生命週期評估最後一個步驟，在此步驟須依照先前所訂定之目的與範疇對評估結果說明。同時，闡釋為合併盤查分析與衝擊評估發現結果的階段，或是在生命週期盤查研究時，使盤查分析的發現結果與所定義的目的及範疇一致。藉此結果以結論與建議的形式提供給決策者，進而作為選用污染性較低的物料、改善生產流程或提升產品設計等決策之參考，其架構圖如圖 2-8 所示^[27]。

圖 2-8 闡釋過程架構^[27]

(資料來源：ISO /CNS 14043)

第三節 綠色或永續混凝土相關研究

Senthamarai 研究報告中提出混凝土中加入廢棄材料一起生產，可定義為永續(綠色)混凝土^[28]。另外 Tange 指出，當混凝土中粒料的 20% 以廢棄產品取代，即為永續(綠色)混凝土^[29]。上述主要為概念性定義，無法涵蓋整體永續的內容，美國混凝土學會依據混凝土性質、使用性及廢棄產品來源等，將永續(綠色)混凝土概分成六大類^[6]：

1. 低碳混凝土(特別是水泥生產技術的改進)
2. 熱傳導改良混凝土：熱質改良、儲熱改良混凝土
3. 耐久混凝土
4. 符合暴雨控制的透水混凝土
5. 改善人居環境的混凝土及使用廢棄物

6. 工業生產過程剩餘的副產物或再生材料混凝土。

Oikonomou 曾強調針對永續發展再生混凝土粒料的應用是非常重要的方案。試驗研究中選擇三種不同來源的再生粒料包括(1)老舊的結構(2)新的結構(3)受到自然災害破壞的結構，依據希臘既有的規範評估其適用範圍並嘗試訂定「綠色」的指標^[30]。

過去混凝土產業，依碳足跡評估混凝土對環境有相當大的負面影響，但近幾年世界各國混凝土產業積極投入各項改善研究，在減碳方面獲得了許多重大進展，特別是使用再生材料生產混凝土逐漸為營建業接受使用並形成一種趨勢。綜合過去研究成果，可歸納以下五項降低對環境衝擊的具體方法^[31]：

1. 盡可能使用輔助膠結料 (Supplementary Cementing Materials, SCMs)，特別是工業生產過程中所殘餘的副產品，如粉煤飛灰、水淬高爐渣、矽灰等
2. 使用再生材料替代天然資源
3. 提高結構物的耐久性及服務壽命以減少材料維修更換的需求
4. 改善混凝土的力學性能或其他性能以減少材料的需求量
5. 清洗用水再利用

第四節 再生材料在混凝土上之應用

2-4-1 飛灰(Fly ash)

粉煤飛灰是煤粉經高溫燃燒後所形成的一種類似火山灰質的混合式材料。燃煤發電廠將煤磨成 100 微米以下之煤粉，利用預熱空氣噴入爐中以懸浮狀態燃燒並產生大量不可燃的高溫廢氣，經集塵設備捕集後即可得粉煤灰。其化學組成與黏土相似，主要成分為二氧化矽、三氧化二鋁、三氧化二鐵、氧化鈣和未燃燼的殘餘碳。目前粉煤灰主要用來生產粉煤飛灰水泥、粉煤飛灰磚、粉煤飛灰矽質砌磚、粉煤飛灰輸氣混凝土及其他建築材料，還可作為農業肥料、土壤改良劑、回收工業原料和環境材料等。

粉煤飛灰於水泥和混凝土產業的應用甚廣。例如，粉煤飛灰可代替黏土原料來生產水泥，矽酸鹽水泥熟料和粉煤飛灰拌合後，加入適量石膏磨細可製成的水硬膠凝材料，並可利用粉煤飛灰配料中未燃燼的殘餘碳。粉煤飛灰亦可作為水泥混合材料，如生產低溫合成水泥，生產原理係將配合料以蒸汽養護生成水化物，再經脫水和低溫固相反應形成水泥礦物。粉煤飛灰亦可用來製作無熟料水泥，包括石灰粉煤飛灰水泥和

粉煤飛灰水泥。石灰粉煤飛灰水泥是將乾燥的粉煤粉灰摻入 10%-30%的生石灰或硝石灰後再和少量的石膏混合研磨成粉末，或者個別磨細後再將其混合均勻製成水硬性膠凝材料。以粉煤飛灰作為砂漿或混凝土的礦物摻料時，係在混凝土中摻加適量粉煤飛灰代替部分水泥或細粒料，不僅能降低成本，而且能提高混凝土的力學性、工作性、抗水滲透性、緻密性、抗硫酸鹽性和耐化學侵蝕性等以達到降低水化熱、改善混凝土的耐高溫性能、減少顆粒分離和析水現象、降低混凝土的體積收縮和開裂以及抑制混凝土中鋼筋的腐蝕等^[32]。

2-4-2 水淬高爐石(ground granulated blast furnace slag, ggbs)

爐石主要是高爐所併同產生出的工業產品，大煉鋼廠在高爐煉鐵過程中，必須加入助熔劑，使鐵礦石及焦炭中之雜質相結合而生成爐渣，爐渣自高爐排出後冷卻所得之固體物稱為高爐石，主要差別是在於冷卻處理過程，一為將高爐渣置於空氣中，使其自然冷卻稱為氣冷爐石，而另一方式則為將高爐渣從高爐取出後立即灑水，使其急速冷卻稱為水淬爐石，水淬高爐石(渣)以矽酸鈣或鋁矽酸鈣為主要成分，比重約 2.9，玻璃質率高達 95%以上，化學成份則主要有二氧化矽、三氧化二鋁、三氧化二鐵、氧化鎂、氧化鈣等成份與水泥極為相近。

在混凝土配比設計中添加飛灰、矽灰及爐石等輔助膠結料，對混凝土的力學性質與耐久性均有正面的影響^[33]。Li 研究報告顯示，混凝土中添加飛灰及爐石，不僅可以加速複合水泥的水化反應，同時也能改善其抗壓強度與孔隙結構^[34]；利用飛灰、矽灰及爐石等輔助膠結料取代部份水泥。結果顯示，矽灰取代部份水泥在抗壓強度和混凝土阻抗的表現較佳，而同時使用爐石、飛灰及矽灰之試體抵抗氯離子侵蝕的能力最好^[35]。但是，當這些工業副產物添加量或取代水泥量的比例過高時，反而會降低混凝土的某些力學性質與耐久性；如，學者 Escalant 分別使用 30%、50%及 70%的爐石取代水泥。結果顯示抗壓強度隨爐石取代水泥量的增加而降低^[36]。

2-4-3 矽灰(Silica fume)

矽灰是鐵矽合金或矽合金工業副產品，是一種高純度非結晶二氧化矽，水泥顆粒大約是矽灰顆粒的100~200倍。此類的矽質材料添加至混凝土中可提高強度及耐久性，另外也有大量的文獻顯示矽灰和火山灰一樣具有填充混凝土孔隙的效果^[37, 38]，由於矽灰具極微小顆粒故處理程序也相對水泥困難，因此在成本方面是較高的。另外，矽灰可應用於配製高強度混凝土、超高早強混凝土等。使用矽灰除可提升混凝土的性能外，

也可大幅降低水泥用量，提昇經濟效益。於國外，矽灰混凝土大多用於高層建築及人工河床，以提高強度、降低成本及增加耐磨性、長期耐久性。

2-4-4 稻殼灰(Rice-husk ash)

稻殼就是俗稱的粗糠，在臺灣及中國不少農民用糠來餵豬，而在歐美等國家，稻殼常常被當成垃圾扔掉，或者墊在家禽或牲畜的圈裡，有的農民甚至把稻殼和稻草一起放把火燒掉。1924 年的德國最早應用稻殼灰於混凝土中，後續一直到現在仍有部分學者朝向更多的材料應用方面研究。1972 年有學者以砌磚為主要研究對象，主要用於石灰-矽質泥磚及耐火磚^[39]，1999 年的研究報告顯示，採用稻殼灰作為混凝土礦物摻料時，建議稻殼的最佳燃燒溫度為 700°C，最佳的取代量為 20%水泥用量^[40]。2011 年，學者 Zerbino 表示，燃燒稻殼會產生大量二氧化碳，而水泥的生產也會產生大量二氧化碳。如果以稻殼灰作為水泥複合式材料摻入混凝土中，將有效減少二氧化碳的排放^[41]。

稻殼是一種有機物質，其主要成分可分為三部分：1.纖維素 2.木質素 3.半纖維素^[42]，而經過高溫燃燒得到的稻殼灰主要成分，大致是以二氧化矽為主，其次是極少量的三氧化二鋁、三氧化二鐵、氧化鈣、氧化鈉、氧化鉀等成分。美國、中國、印度及其他人口眾多的國家每年皆會製造出大量的稻殼灰。目前來說，稻米和混凝土兩者的消耗量都是非常大的，所以對於許多開發或開發中的國家而言，稻殼灰具有相當的研究潛力的。

2-4-5 再生粒料 (recycled aggregate)

由建築物拆除之廢棄材料(Construction and demolition waste,C&D waste)在美國每年就約產生 2~3 億噸，使得棄置堆填區已無法再容納如此驚人的數量，特別是在土地面積較小的國家如日本，剩餘的垃圾掩埋場容積估計僅剩短短的幾年^[43]，加上粒料來源日益匱乏等因素，因此利用再生混凝土粒料(Recycled concrete aggregate, RCA)替代天然粒料材料逐漸普及。在歐洲，再生混凝土大多被用來當作路面基層或底基層材料(C&D)^[44]，由於再生混凝土較便宜，若品質良好則比一般混凝土粒料更具價值，且原料的取得來自於回收再利用，是混凝土科技的一項新革新^[45, 46]，然而，再生粒料混凝土密度比普通混凝土低，在加上粒料本身可能殘留許多不純物如石膏、土壤、瀝青等都可能危害到混凝土品質。另外，有學者認為再生粒料也會導致混凝土的彈性模數減少，增加潛變、收縮變形、高滲透性進而降低其耐久性。Fathifazl 等曾提出，可以用“等效

砂漿體積”的方式來計算混凝土添加再生粒料的的比例，如此便可獲致與傳統混凝土相近的強度^[47]。

2-4-6 廢棄玻璃(post-consumer glass)

哥倫比亞大學的研究表示，廢玻璃適合做為混凝土的粒料，市場上的廢棄玻璃運用在混凝土的生產製造上，在經濟上是可行的^[48]。紐約市每年出售廢棄玻璃超過60萬美元，一般都認為扔掉空瓶比回收空瓶來的便宜來的有價值，這種觀念應該要改變。舉例來說，美國的鋪路石製造商，每年可以單獨地使用20萬噸的玻璃，相當於紐約市每年可以收集的量，但其卻無法負擔，比目前支付砂和石來的更貴的玻璃^[49]。廢玻璃產品都早已經被商業化生產，縱使許多城市在廢玻璃處理上都付出可觀的成本支出，但製造商仍需支付近每噸百美元的購買廢棄玻璃^[50, 51]。現今做為增值產品的玻璃如水磨石磚、牆板、桌面櫃檯等，若顧客願意使用更高階的類似產品，可以支付玻璃處理更高的額外費用，該產品也可能與天然石材(如:大理石與花崗岩)相比具競爭力。

2-4-7 再生輪胎(recycled tires)

發達國家每年產生數以億計的廢舊輪胎並造成嚴重的環境問題。廢棄輪胎除不美觀外，還會造成火災隱憂與蚊蟲孳生危害健康等重大問題。研究指出，輪胎燃燒所造成火災可能延續數月甚至數年^[52]。因此，將廢棄輪胎丟置垃圾掩埋場一般是被法令所禁止的。由於業者非法傾倒廢舊輪胎案例一直不斷地在增加，伴隨來的便是許多環境污染的問題，最有意義的解決方案就是回收再利用^[53, 54]。廢棄輪胎最常見的處理方法是將廢棄輪胎視為燃料應用在蒸汽和電能或熱能的生產。在美國和歐洲，廢棄輪胎可當作製造水泥的替代燃料^[55]。另外，廢棄輪胎也可以加工處理後作為熱拌瀝青或瀝青路面的改質黏結劑^[56]。文獻指出，橡膠輪胎替代混凝土的粒料可增加混凝土的力學性質^[57]，另外橡膠顆粒具有抑制裂縫擴張的作用，顯著的提高應變能力、延展性和能量吸收能力，故將廢棄輪胎應用在混凝土中是可行的，但當橡膠含量增加過高時卻會降低混凝土的抗壓強度、抗張強度及剛性^[58]。

2-4-8 其他再生材料(Other recycled materials)

混凝土組合材料中，除上述幾種再生利用材料外，尚有其它已被研發可做為替代水泥或粒料的其它材料如椰子樹殼等。

第三章 永續混凝土定義、內涵及應用範圍

第一節 永續混凝土定義與內涵

永續發展最早於1972年，聯合國在瑞典舉辦的斯德哥爾摩人類環境大會上提出，該大會主要為已開發國家及開發中國家，針對環境保護和經濟發展相關議題進行廣泛討論^[59]。1992年聯合國再次於巴西里約熱內盧召開環境發展大會，該大會又稱為地球大會。該次大會舉行宗旨是回顧第一次人類環境大會召開後20年來的全球環境保護歷程，敦促世界各國政府注意並告知大眾採取適當措施、共同努力，以防止全球持續環境汙染和生態惡化，提倡人類應繫手努力共同保護生存環境。會議通過關於環境與發展的「里約熱內盧宣言」又稱「地球憲章」與「21世紀行動議程」，共計154個國家簽署「氣候變化公約」，148個國家簽署「生物多樣性公約」。公約簽訂宗旨是在告知人們「地球在我們手中」^[60]。

永續發展目前尚無統一的定義，目前普遍被接受的定義主要為1978年環境與發展委員會工作報告中發表的「永續發展定義」即：“人類各項發展外除能滿足這一代需要外，而不會影響到後代子孫追求他們各項需求的能力”。永續發展須結合環境、社會、經濟等三種層面，作為主要考量因子。混凝土在人類物質文明建設上，扮演著重要的角色，所以永續混凝土的開發即是為符合永續發展理念所衍生，其內涵概可歸類為以下幾點：

1. 促進環境保護與改善
2. 確保人類身體健康與種族文化的多樣性
3. 提升社會與經濟的穩定性
4. 建立便利與高效能的交通與居住條件
5. 結合美觀設計與優質的工程建設
6. 節約能源
7. 終生學習與教育

第二節 永續混凝土應用範圍

ACI永續混凝土指標一書指出，永續混凝土可分成六大類：低碳混凝土(特別是水泥生產技術的改進)；改良熱傳導混凝土：改良熱質、儲熱混凝土；耐久混凝土；符合暴雨管理的透水混凝土；改善人居環境的混凝土及使用廢棄物、工業副產物或再生材料混凝土。ACI提出永續混凝土的種類，但永續混凝土的應用還需從社會、環境與經濟等三個角度，以生命週期評估方式進行選擇與設計開發，依其設計的需求，開發與選擇適當混凝土類型。

案例：假設某單位想蓋一棟房子(RC結構)，A廠商計畫蓋的房子最高的服務年限為50年預計耗資1000萬，而B廠商計畫蓋的房子最高的服務年限為80年預計耗資1200萬。

說明：也許就金額面A廠商所開出來的條件1000萬是最有利的選擇條件，但以永續角度來看眼前產品價格就不一定是最有利的選擇條件了，產品的選擇應綜合產品整個生命週期的各項條件，依其功能選擇最適當的產品。案例中也許耗資1000萬的房子比耗資1200萬的房子划算，但實際來看A廠商蓋的房子可能50年後就會開始劣化需要維護或拆除重建，而這些維護的費用也許就可能超過1000萬與1200萬原先的價差。雖然B廠商蓋的房子比A廠商蓋的房子貴了200萬，但在功能需求上B廠商的房子比A廠商的房子擁有更好耐久性的功能，可以省去日後30年可能發生的劣化及維護等問題。

永續混凝土的應用，除了性能的要求外，還要考量永續性。1998年美國總統柯林頓簽署的行政命令第13101號，內容要求聯邦政府各機構產品採購應參照採美國環保署訂定的「永續(綠色)採購指南」。採購指南核心概念為永續(綠色)採購(Environmentally Preferable Purchasing, EPP)的五項指導原則^[61]：

1. 產品選擇必須以其性能(Performance)、價格(Price)與環保特性(Environment)為基礎；
2. 優先考慮能夠避免環境污染的產品；
3. 環境評估需審視全產品生命週期中的多重環境特徵；
4. 產品選擇必須以相互競爭產品的特性和環境影響比較分析為基礎；

5. 評估必須以良好的環境相關訊息為基準。

本研究透過問卷調查及專家座談方式，蒐集營建業對永續混凝土的看法，以訂定永續混凝土的評估指標；同時進行系列試驗，依據文獻永續混凝土相關研究與材料性能的檢試驗方法，進行試驗；最後應用生命週期評估法，比較不同配比混凝土對環境衝擊之影響。

第四章問卷調查與專家座談

第一節 層級分析法(Analytical Hierarchy Process, AHP)

層級分析法是美國匹茲堡大學教授Thomas L. Satty於1971年發展出來的一種決策方法。這方法主要應用在不確定情況下及具有多個評估準則之決策問題上，可處理量化及質化資料。這方法係以邏輯及完整的方法來應用資料、經驗及直覺，可推出並求得優選順序及權重。經由此法，可將先前已存在但彼此並無關聯的觀念及方法結合起來，其中包括複雜問題的層級結構化、兩兩比較、特徵向量法及一致性的考量。層級分析法的基本架構，如圖4-1所示。

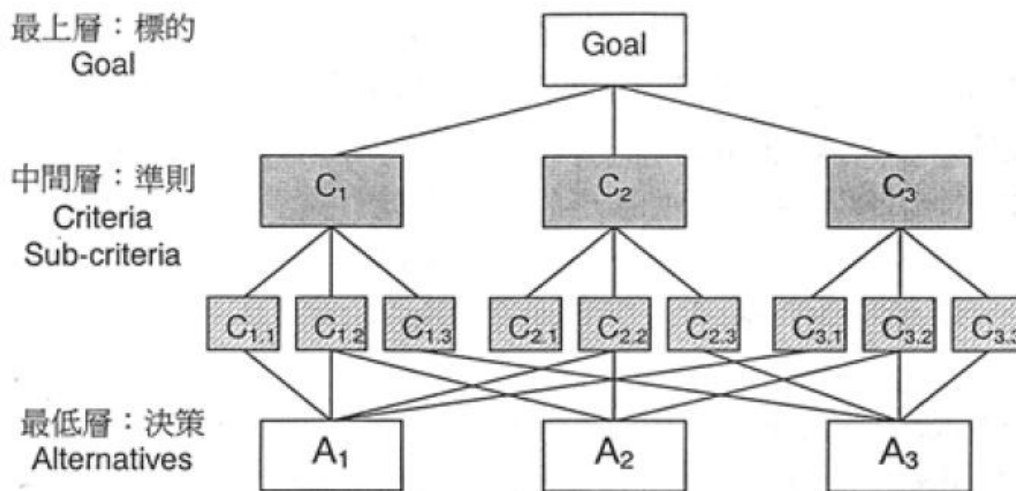


圖 4-1 層級分析法架構圖^[62]

(資料來源:潘智謙, 2006)

4-1-1 AHP決策問題之分析:

1. 建立各層級之成對比較矩陣(Pairwise Comparison Matrix)。
2. 求取各層級要素的權重，利用數值分析中的特徵值解法計算出特徵值與特徵向量，求取各元素的相對權重，找出優勢向量(priority eigenvector)。

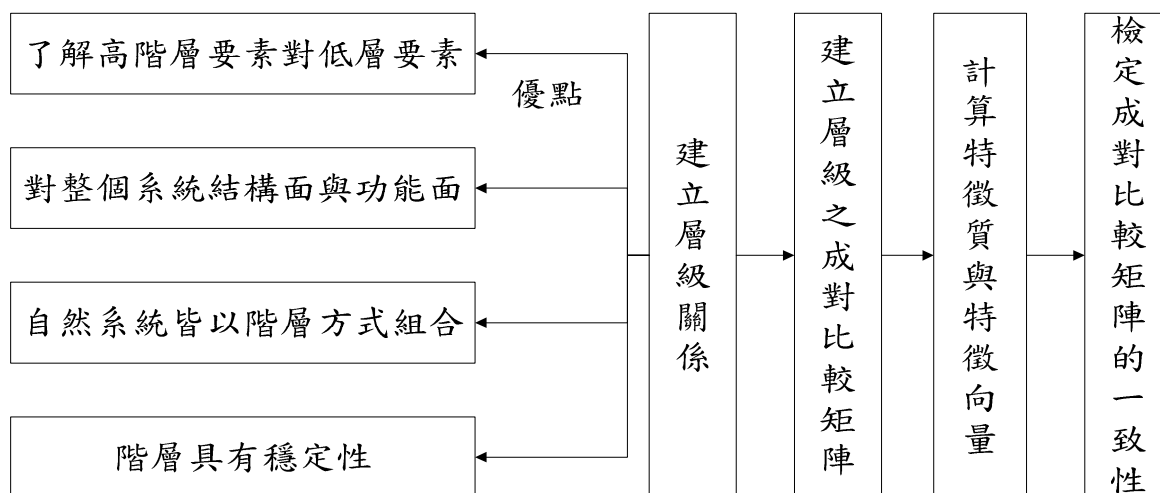


圖 4-2 AHP 決策問題之分析流程

(資料來源：AHP)

4-1-2 一致性檢定:

目的為檢測決策者在成對比較時前後的一貫性與一致性指標(Consistency Index, C.I.)，C.I.值愈小則一致性愈高，指標值建議在0.1左右，亦即當C.I.>0.1時則對應成對比較矩陣重新評比，如此一致性才能獲得保證。

第二節 問卷設計

本計畫採用層級分析法，其假設條件的基本架構，如圖 4-3。

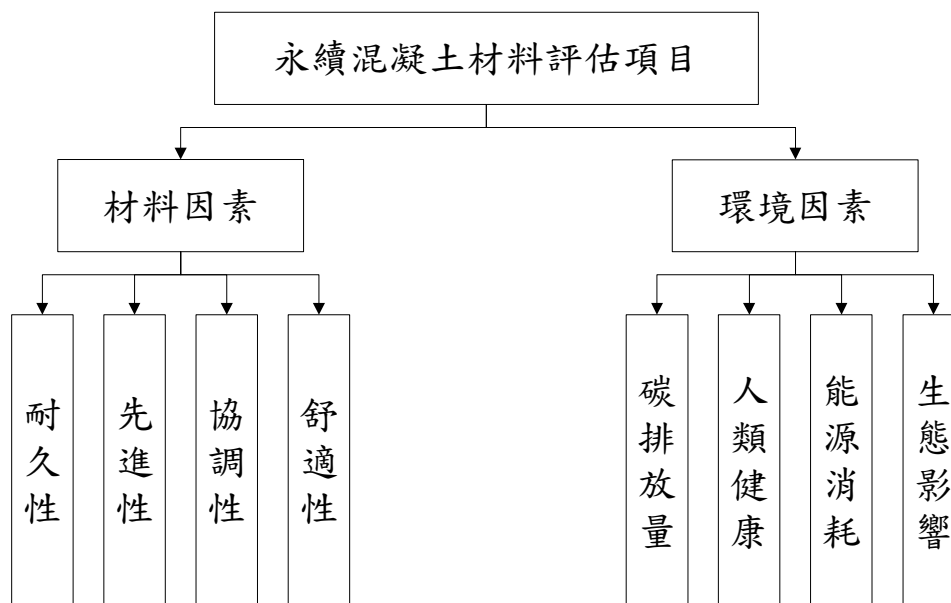


圖 4-3 永續混凝土材料評估架構

(資料來源：本研究整理)

永續材料主要考量材料使用對環境衝擊及能源或資源使用的影響。本研究分為材料因素與環境因素列入評量。表 4-1 與表 4-2 為材料與環境因素對應之項目。

表 4-1 材料因素

項 目	說明及目標
耐 久 性	延長建築物的使用年限以減少資源的耗損
先 進 性	優異的使用性能使混凝土達到永續的目的
舒 適 性	材料的感官性質，要求對材料的感覺舒服，使用者樂於採用，這是材料的一種新性能
協 調 性	即材料在製備、流通、使用和廢棄的全過程中必須保持與地球生態環境的平衡

(資料來源：本研究整理)

表 4-2 環境因素

項 目	說明及目標
碳 排 放 量	減少生產水泥所製造的 CO ₂ 排放量
人 類 健 康	減少有毒物質的生成以降低對人類健康的危害
能 源 消 耗	使用回收或再生材料替代以減少天然資源的開採
生 態 影 響	降低從原料開採到消費者使用、回收和維修，最終作為廢棄處理和處置所產生的成本

(資料來源：本研究整理)

4-2-1 『永續混凝土→材料因素』評估項目之權重問卷-問卷說明：

針對永續混凝土材料項目，主要將其分為材料因素、環境因素兩個評估準則，分別加以評估，勾選方式，如範例表 4-3 所示，若認為左邊的考量因子相較於右邊是比較重要的，則選擇「左邊重要性較右邊重要」選擇自己主觀的項目(絕對重要~相等)勾選，相對的若認為右邊的考量因子相較於左邊是比較重要的，則選擇「右邊重要性較左邊重要」同樣選擇自己主觀之項目(絕對重要~相等)勾選，另外數字 1~9 越大則表示越重要。表 3-3 是以甲和乙兩因素為例，假設 X 學者認為，永續混凝土材料開發，乙因素是比甲因素「重要」的，而且它的重要性比值應該為 1(左)：5(右)，則請在靠近「乙因素」(右方)的位置選擇 1:5 註記。範例如表 4-3 所示。

表 4-3 因素相對重要性勾選範例

評估準則	左邊重要性較右邊重要								右邊重要性較左邊重要								評估準則	
	絕對重要		相當重要		重要		稍微重要		相等	稍微重要		重要		相當重要		絕對重要		
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1		1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8		1:9
甲因素									1:1				✓					乙因素

(資料來源：本研究整理)

4-2-2 『永續混凝土→材料因素』評估項目之權重問卷-問卷說明：

1. 永續混凝土材料評估因子分為兩類：材料因素與環境因素，如表 4-4 所示。
2. 針對材料因素可分為耐久性、先進性、協調性、舒適性共四個指標，而針對環境因素可分為碳排放量、人類健康、能源消耗、生態影響個指標，如表 4-5、表 4-6 所示。

表 4-4 材料因素與環境因素相對重要性勾選表

評估準則	左邊重要性較右邊重要								右邊重要性較左邊重要								評估準則	
	絕對重要		相當重要		重要		稍微重要		相等	稍微重要		重要		相當重要		絕對重要		
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1		1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8		1:9
材料因素																		環境因素

(資料來源：本研究整理)

表 4-5 材料因素相對重要性勾選表

評估準則	左邊重要性較右邊重要									右邊重要性較左邊重要									評估準則
	絕對重要		相當重要		重要		稍微重要		相等	稍微重要		重要		相當重要		絕對重要			
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9		
耐久性																			先進性
耐久性																			協調性
耐久性																			舒適性
先進性																			協調性
先進性																			舒適性
協調性																			舒適性

(資料來源：本研究整理)

表 4-6 環境因素相對重要性勾選表

評估準則	左邊重要性較右邊重要								右邊重要性較左邊重要								評估準則	
	絕對重要		相當重要		重要		稍微重要		相等	稍微重要		重要		相當重要		絕對重要		
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1		1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8		1:9
碳排放量																		人類健康
碳排放量																		能源消耗
碳排放量																		生態影響
人類健康																		能源消耗
人類健康																		生態影響
能源消耗																		生態影響

(資料來源：本研究整理)

第四節問卷調查與結果分析

4-4-1 問卷調查

於 2011/09/30 在臺灣科技大學國際館 7 樓 707 會議室邀請 16 位學者專家與會，進行研究計劃討論、問卷內容說明與填寫問卷。

4.4.2 AHP 統計分析結果：

依據問卷填寫結果，套入 AHP 軟體進行統計分析，獲得環境因素的權重指數為 0.774，大於材料因素 0.226，表示與會人員認為永續混凝土之評估指標，環境因素大於材料因素，根據可靠性分析結果，得知 Inconsistency 等於 0，表示與會人員一致認同。詳如圖 4-4 所示



圖 4-4 永續混凝土材料評估之權重指數

(資料來源：本研究整理)

根據分析結果，環境因素的項目中，以人類健康的權重指數為 0.255 表示最重要，次為碳排放量的影響權重指數為 0.230，然後為能源消耗權重指數 0.171，最後則為生態影響權重指數 0.139。另外在材料因素方面，以耐久性權重指數最高為 0.075，再來便是先進性與協調性的權重指數分別為 0.051 及 0.050，最後舒適性權重指數僅有 0.029。以上結果根據可靠性評估 Inconsistency 等於 0.01，因此表示與會人員大致認同。詳如圖 4-5 所示。



圖 4-5 材料與環境因素之權重指數

(資料來源：本研究整理)

第五章 試驗計畫及結果討論

本章節參考 ACI 永續混凝土指針建議的類別，透過試驗來評估影響永續混凝土性質的材料參數及應用範圍。

第一節 低碳混凝土

水泥是混凝土二氧化碳排放量的主要來源，為了減少水泥帶來的汙染問題，除了改良水泥的製程技術外，其次有效的方法是減少混凝土中水泥的用量，及添加大量替代水泥的礦物摻料(輔助膠凝材料)。輔助膠凝材料指的是除填充料以外的粉料，輔助膠凝材料有些本身會產生水化反應具有水硬性，或是具有潛在水硬性，它們亦可能與水泥的水化產物發生化學反應，產生膠結性。

粉煤飛灰與水淬高爐石粉是當前應用最廣泛使用最大量的輔助膠凝材料，取代部分水泥，能夠改善混凝土的多項性能如新拌混凝土的工作性，硬固混凝土的強度，體積穩定性及耐久性。因此在試驗案例中，主要以粉煤飛灰及水淬高爐石的應用，為案例來討論改善混凝土碳排放的策略。

粉煤飛灰與水淬高爐石粉可運用於混凝土的配比設計，「CNS 11270 卜特蘭飛灰水泥」將飛灰依含量分成 A、B、C 等 3 類，飛灰的使用量大致限制在水泥質量的 5%~30%。「CNS 3654 卜特蘭高爐水泥」建議高爐石粉末用量佔水泥重量百分率 25%~65%。ASTM C 595 建議高爐石粉用量佔水泥重量百分率 20%~80%。然而，目前 CNS 11270 與 CNS 3654 於民國 100 年 3 月已公佈廢止。關於飛灰、爐石和其它礦物摻料的使用可參考「CNS 15286 水硬性混合水泥」，當中是依水泥的期望用途分為 IS 型 IP 型兩類，其中 IS 型水泥中高爐石粉的最大容許用量是質量比的 70%，而 IP 型則是規定 NaO 的當量。本節僅就強度及成本的觀點來討論，於第六章混凝土生命週期評估延續此節，再加入碳排放的量化計算加以探討。

5-1-1 試驗案例

5-1-1-1 試驗材料

拌合用水：採自來水，符合 CNS 拌合水之要求。

粗粒料：粗粒料的最大粒徑為 20 mm，乾搗單位重為 1652 kg/m^3 ，比重 2.54，吸水率 0.88%，篩分析結果如表 5-1 所示。

天然細粒料：天然河砂的細度模數為 3.2，比重為 2.72，吸水率 2%，篩分析結果如表 5-2 所示。

水泥：卜特蘭 Type I 水泥，其性質符合 CNS61 第 I 型卜特蘭水泥之要求，其化學及物理性質如表 5-3 與表 5-4 所示。

飛灰：採用 F 級飛灰，細度達 376 m²/kg，通過 #325 篩約佔 14%，比重為 2.27。化學及物理性質詳列於表 5-3 與表 5-4。

水淬高爐石粉：細度達 412 m²/kg，比重為 2.89，化學及物理性質詳列於表 5-3 與表 5-4。

NaOH：採用約 5 mm 大小之顆粒，可直接與空氣中水分反應而液化，化學成分詳如表 5-5 所示，外觀如圖 5-1 所示。

Na₂SiO₃：模數 n 等於 1.97，比重為 1.54，液固比為 1.27。化學成分如表 5-6 所示，外觀如圖 5-2 所示。

H₃PO₄：比重 1.69，化學成分如表 5-7 所示，外觀如圖 5-3 所示。

表 5-1 粗粒料篩分析

篩號	各篩停留量(g)	停留百分率(%)	累積停留百分率(%)	通過百分率(%)
1"	0	0	0	100
3/4"	14	0.14%	0.14%	100
1/2"	1275	12.75%	12.89%	99.87
3/8"	1640	16.4%	29.29%	99.71
#4	6210	62.1%	91.39%	99.09
底盤	825	8.25%	100%	0

(資料來源：本研究整理)

表 5-2 細粒料篩分析

篩號	各篩停留量(g)	停留百分率(%)	累積停留百分率(%)	通過百分率(%)
3/8"	0	0	0	100
No.4	0	0	0	100
No.8	0.5	0.25	0.25	99.75
No.16	20.9	10.45	10.7	89.3
No.30	67.1	33.55	44.25	55.75
No.50	61.7	30.85	75.1	24.9
No.100	29.3	14.65	89.75	10.25
底盤	20.5	10.25	100	0
total	200	100	F.M	3.2

(資料來源：本研究整理)

表 5-3 膠結材料化學成分

項目 (%)	水泥 I 型	水淬高爐石粉	飛灰	矽灰	稻殼灰
二氧化矽 (SiO ₂)	21.04	33.42	57.2	92.63	92
氧化鋁 (Al ₂ O ₃)	5.46	13.35	20.8	-	0.41
氧化鐵 (Fe ₂ O ₃)	2.98	0.21	8.1	-	0.6
氧化鈣 (CaO)	63.56	41.16	2.4	-	1.2
氧化鎂 (MgO)	2.52	7.76	2.2	-	0.5
三氧化硫 (SO ₃)	-	-	-	-	-
三氧化硫(SO ₃) %	C ₃ A ≤8%	-	0.61	-	-
	C ₃ A ≥8%	2.01	-	-	-
燒失量(L.O.I)	1.38	0.30	2.1	2.95	-
有效鹼類 (Na ₂ O+0.65K ₂ O)	0.78	-	-	-	-
氧化鈉 (Na ₂ O)	0.32	-	-	-	-
氧化鉀 (K ₂ O)	0.7	-	0.8	-	-
游離氧化鈣 (Free CaO)	0.76	-	-	-	-
矽酸三鈣 (C ₃ S)	49.08	-	-	-	-
矽酸二鈣 (C ₂ S)	23.3	-	-	-	-
鋁酸三鈣 (C ₃ S)	9.43	-	-	-	-
鋁鐵酸四鈣 (C ₄ AF)	9.07	-	-	-	-

(資料來源：本研究整理)

表 5-4 膠結料物理性質

項目	水泥 I 型	爐石	飛灰	矽灰	稻殼灰
比重	3.15	2.89	2.27	2.2	1.98
細度(透氣儀試驗) (m ² /kg)	362	412	376	-	-
正常稠度用水量 (%)	25.8	-	-	-	-
假凝結 (%)	87.3	-	-	-	-
凝結時間	-	-	-	-	-
初凝 (min.)	195	-	-	-	-
終凝 (min.)	290	-	-	-	-
抗壓試驗 (psi)	3 天	3602	-	-	-
	7 天	5092	-	-	-
	28 天	6418	-	-	-
水泥砂漿空氣含量(體積比) (%)	3.23	-	-	-	-
細度(NO.325 濕篩法停留量) (%)	-	2.2	14	96.16	-

(資料來源：本研究整理)

表 5-5 NaOH 化學成分

化學成份	含量
Chloride(Cl)	Max. 0.005 %
Sulfate(SO ₄)	Max. 0.003 %
Silicate(SiO ₂)	Max. 0.01 %
Phosphate(PO ₄)	Max. 0.001%
Heavy metal (as.Pb)	Max. 0.001%
Iron(Fe)	Max. 0.0007%
Aluminum(Al)	Max. 0.003%
Calcium (Ca)	Max. 0.001%
Magnesium(Mg)	Max. 0.0005%
Potassium(K)	Max. 0.1%
Total Nitrogen(N)	Max. 0.001%
Arsenic(As)	Max. 0.0002%
Sodium Carbonate(Na ₂ CO ₃)	Max.2.0
Assay (NaOH)	Max. 95.0

(資料來源：德行化工)

表 5-6 Na₂SiO₃ 化學成分

化學成份	含量
Assay(Na ₂ O)	14.8%
Silicic acid(SiO ₂)	29.2%
H ₂ O	56.8%

(資料來源：德行化工)

表 5-7 H₃PO₄ 化學成分

化學成份	含量
Chloride(Cl)	Max. 0.001 %
Nitrate (NO ₃)	To pass test
Sulfate (SO ₄)	Max. 0.006 %
Alkali and other phosphates (sulfate)	To pass test
Substances Reducing KMnO ₄	To pass test
Heavy Metals (as Pb)	Max. 0.001%
Iron (Fe)	Max. 0.005%
Arsenic (As)	Max. 0.0003%
Specific Gravity	1.700-1.710
Assay	Max. 85.0%

(資料來源：德信化工)



圖 5-1 水淬爐石粉末



圖 5-2 粉煤飛灰

(資料來源：本研究整理)

(資料來源：本研究整理)



圖 5-3 NaOH

(資料來源：本研究整理)



圖 5-4 Na₂SiO₃

(資料來源：本研究整理)



圖 5-5 H₃PO₄

(資料來源：本研究整理)

5-1-1-2 試驗方法

抗壓強度試驗

本試驗依據 ASTM C39 之方法進行，將養護齡期已達到 7 天、14 天及 28 天的混凝土圓柱試體由水中取出後，經蓋平並置於混凝土壓力試驗機上，以每秒鐘 1.4~3.5 kgf/cm² 的速率控制並平均加壓於試體，至其破壞為止。

$$\text{砂漿抗壓強度(kgf/cm}^2\text{)} = \frac{P}{A} \quad (5-1)$$

P：最大重值(kgf)

A：實際受力面積(cm²)

5-1-1-3 試驗配比

配比設計中普通混凝土(控制組)的水膠比為 0.5，而比照組則選擇粉煤飛灰、水淬

高爐石粉並各以水泥重量比 10%、30%、50%的方式來取代水泥用量。另外，配比中還利用鹼激發爐石混凝土的技術，以鹼模數(0.75)來調製鹼液，希望經由強鹼的作用來激發水淬高爐石粉的潛在活性並能夠完全取代水泥，配比設計，如表 5-8 所示。

編號說明：OPC 表示普通混凝土；

F 表示粉煤飛灰；

S 表示水淬高爐石粉；

數字表示取代量。

表 5-8 低碳混凝土配比(kg/m³)

編號	水膠比	水	水泥	粉煤飛灰	水淬爐石粉	粗粒料	細粒料	Na ₂ SiO ₃	NaOH	H ₃ PO ₄
OPC		220	440	-	-	934	649	-	-	-
F1		220	396	44	-	926	644	-	-	-
F3		220	308	132	-	910	632	-	-	-
F5	0.5	220	220	220	-	893	621	-	-	-
S1		220	220	-	44	934	648	-	-	-
S3		220	308	-	132	928	645	-	-	-
S5		220	220	-	220	925	643	-	-	-
AAS		116	-	-	440	915	640	64.9	20.43	2.18

(資料來源：本研究整理)

5-1-1-4 試驗結果與討論

低碳混凝土抗壓強度試驗結果

表 5-9 為低碳混凝土抗壓強度的試驗結果，由圖 5-6 可得知，混凝土會隨著養護齡期、摻料的組合及添加量而產生不同的變化。

表 5-9 低碳混凝土抗壓強度試驗結果(MPa)

養護天數	編號	OPC	S1	S3	S5	F1	F3	F5	AAS
	7		36.85	35.06	31.86	18.22	34.65	24.75	16.22
14		40.78	40.12	35.23	20.61	39.45	32.4	17.09	54.17
28		44.3	41.59	39.51	24.77	40.86	36	18.17	65.32

(資料來源：本研究整理)

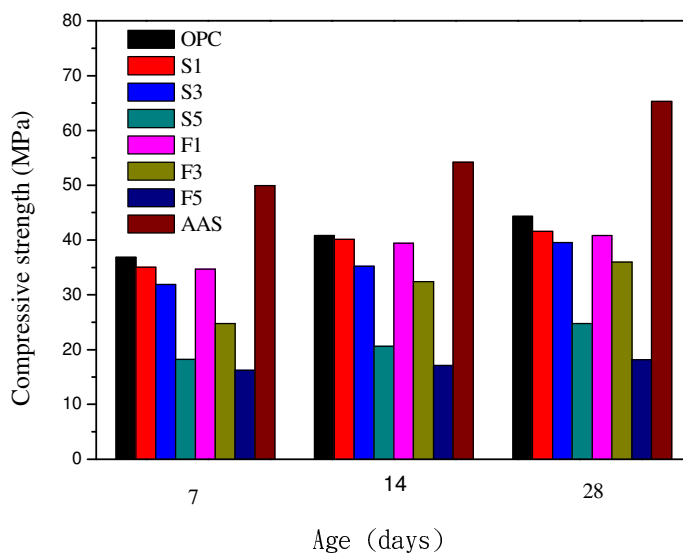


圖 5-6 低碳混凝土抗壓強度

(資料來源：本研究整理)

摻料對混凝土成本之影響

根據實際訪查，水泥的市價 1 包大約 150 元、水淬高爐石粉 1 公噸約 1300 元、粉煤飛灰 1 公噸約 600 元、天然細粒料 1m³ 約 1050 元、天然粗粒料 1m³ 約 1100 元、NaOH 25 kg 約 3000 元、Na₂SiO₃ 1 公噸約 7000 元、H₃PO₄ 1 kg 約 3250 元。經計算後得知，水膠比 0.5 的普通混凝土(OPC)每立方造價約 NT 1973 元。由圖 5-7 得知，粉煤飛灰每取代水泥重量的 10 %大約可減少 5.6 %成本、水淬高爐石取代水泥重量的 10%大約可減少 3.8 %成本，但當水淬爐石粉完全取代水泥時，造價卻反而高約 2 倍的價格。透過表 5-10 可以發現主要的原因是鹼活化劑，當水淬高爐石粉完全取代水泥時，必須要透過鹼液來機發它的潛在活性，因此需要大量的藥劑，但目前藥劑的市價偏高，相對的影響到混凝土的造價。有鑑於此，永續混凝土材料的選擇除了要考量到環境與性能外，成本效益亦是一項值得列入考量的因子。

表 5-10 低碳混凝土組成材料概估價格(NT\$)

編號	水	水泥	粉煤飛灰	水淬高爐石粉	粗粒料	細粒料	Na ₂ SiO ₃	NaOH	H ₃ PO ₄	總計
OPC	2	1320	-	-	392	260	-	-	-	1973
F1	2	1188	26	-	389	258	-	-	-	1863
F3	2	924	79	-	382	253	-	-	-	1640
F5	2	660	132	-	375	248	-	-	-	1417
S1	2	1188	-	57	392	259	-	-	-	1898
S3	2	924	-	172	390	258	-	-	-	1745
S5	2	660	-	286	389	257	-	-	-	1593
AAS	1	-	-	572	384	256	454	2452	283	4402

(資料來源：本研究整理)

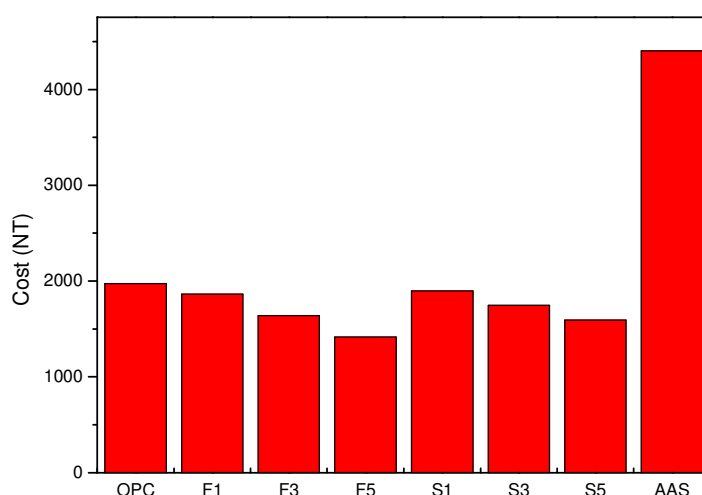


圖 5-7 低碳混凝土概估價格(NT\$)

(資料來源：本研究整理)

第二節 熱傳導改良混凝土

縱使全球暖化現象是一個大趨勢，但實際處於任一個已開發國家的大城市或島國時，都有可能出現熱夏暖冬、熱夏寒冬、涼夏暖冬、涼夏寒冬等多種的氣候組合，甚至會交替出現^[63]。另一方面，日常生活中人們為了滿足個人的基本需求大量使用許多耗能的電氣用品，以台北市為例，平均每戶家中至少裝設有兩台以上的空調設備。總之，不論是嚴寒的冬天或酷暑，大部份人都希望能夠待在溫暖、舒適一個室內環境，但當下誰又能料想到這些享受所帶來的負面影響。目前全球的結構物大多屬於鋼筋混凝土構造物，若能對混凝土的熱傳導或儲熱功能(改良室內環境的儲濕與放濕功能)進行

改良，勢必有機會達到節能減碳及改善居住環境舒適度之目的。因此，此節主要從材料的熱傳導與儲熱功能列舉兩項試驗案例。

Tommy 在永續發展及混凝土技術研討會中提出，當輕質粒料(Lightweight Aggregate Concrete, LWAC)替代混凝土中的天然粗粒料時，不僅能夠減少混凝土的自重和降低混凝土的熱傳導係數，亦能滿足工作性及強度的需求^[64]。過去研究曾指出，蒙脫土、沸石、矽藻土及膨潤土等材料因具有層狀或微孔結構的鋁矽酸鹽礦物，故具有陽離子的可交換性，使得這些材料能夠吸附和釋放水氣^[65]。

5-2-1 試驗案例一

5-2-1-1 試驗材料

輕質粗粒料：採用水庫淤泥來源並經過造粒及燒結過程後所生成之再生輕質粗粒料。

比重為 1.46，最大粒徑約 2 cm，外觀如圖 5-8 所示。

陶瓷粗粒料：為陶瓷廠的瑕疵品，經過破碎處理後，最大粒徑約 3~4 cm，比重為 2.4，

外觀如圖 5-9 所示。

拌合用水：請參閱 5-1-1-1。

天然粗粒料：請參閱 5-1-1-1。

天然細粒料：請參閱 5-1-1-1。

水泥：請參閱 5-1-1-1。

飛灰：請參閱 5-1-1-1。

水淬高爐石粉：請參閱 5-1-1-1。



圖 5-8 輕質粒料



圖 5-9 陶瓷粒料

(資料來源：本研究整理)

(資料來源：本研究整理)

5-2-1-2 試驗方法

熱傳導係數試驗

本試驗主要參考「CNS 7332 隔熱材料之導熱係數測定法」進行。熱傳導是法國科學家傅立葉所定義，當熱量沿著物體兩端的溫度差傳遞時，x 向的單維時間內之熱傳導量、垂直方向之截面積跟 x 方向之距離可透過式 5-1 表示其關係，並引入常數 k 可得式 5-2，常數 k 即為材料之熱傳導係數。

$$q_x \propto -A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (5-2)$$

$$q_x = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (5-3)$$

式中 q_x ：熱傳導量(W)

T_2-T_1 ：兩端溫度差(ΔT)

A：截面積(m^2)

Δx ：垂直方向之截面積(A)跟 x 方向之距離(m)

k：常數(W/m.k)

5-2-1-3 試驗配比

配比設計中主要選擇輕質粗粒料與陶瓷粗粒料來完全取代普通混凝土的粗粒料，同時也採用粉煤飛灰及水淬高爐石粉，分別取代水泥重量的 30% 來做為混凝土。此試驗案例的目的在於探討這些材料對於混凝土熱傳導係數之影響，配比設計如表 5-11 所示。

表 5-11 熱傳導改良混凝土配比(kg/m^3)

編號	水膠比	水泥	飛灰	水淬高爐石粉	天然細粒料	天然粗粒料	輕質粗粒料	陶瓷粗粒料
OPC		440	-	-	649	934	-	-
L		440	-	-	649	-	537	-
LS		308	-	132	647	-	535	-
LF	0.5	308	132	-	638	-	528	-
C		440	-	-	649	-	-	879
CS		308	-	132	647	-	-	875
CF		308	132	-	638	-	-	863

(資料來源：本研究整理)

編號說明：OPC 表示普通混凝土；

F 表示粉煤飛灰；

S 表示水淬高爐石粉；

L 表示輕質粗粒料；

C 表示陶瓷粗粒料；

5-2-1-4 試驗結果與討論

輕質粒料對混凝土自重的影響

一直以來，混凝土的自重對於許多高樓建築和大型建設而言是一項必須克服的問題，透過表 5-12 可以發現輕質粗粒料與陶瓷粗粒料可以完全取代天然粗粒料，故可減少普通混凝土的自重，其中以輕質粗粒料最為明顯，可以降低約 20% 的自重。

表 5-12 混凝土單位體積重

編號	OPC	C	CS	CF	L	LS	LF
單位體積重(kg/m ³)	2023	1968	1962	1941	1626	1622	1606

(資料來源：本研究整理)

熱傳導改良混凝土抗壓強度試驗結果

表 5-13 及圖 5-10 為熱傳導改良混凝土抗壓強度的試驗結果。

表 5-13 熱傳導改良混凝土抗壓強度試驗結果(MPa)

編號 養護天數	OPC	C	CS	CF	L	LS	LF
7	36.85	21.96	17.88	15.64	32.11	31.86	26.58
14	40.78	24.33	27.39	20.92	37.62	35.86	29.68
28	44.3	28.32	30.9	23.85	45.34	44.19	39.97

(資料來源：本研究整理)

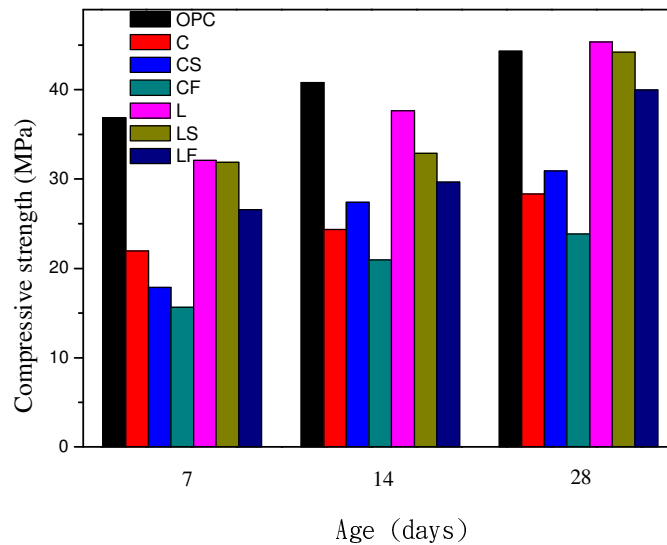


圖 5-10 熱傳導改良混凝土抗壓強度

(資料來源：本研究整理)

陶瓷粗粒料、輕質粗粒料對混凝土抗壓強度的影響

圖 5-11 顯示，當陶瓷粗粒料完全取代混凝土的天然粗粒料時，養護 28 天的抗壓強度相對於普通混凝土會降低至少 36% 的抗壓強度。相對而言，圖 5-12 顯示，輕質粒料完全取代混凝土的天然粗粒料，除了在第 7 天與 14 天時，明顯分別降低約 13 % 及 8 % 的強度外，於 28 天時僅增加了 2 %，因此對於抗壓強度而言，基本上是沒太大變化的。圖 5-11 與 5-12 中可以發現，當混凝土中添加 30 % (水泥重量比) 水淬高爐石時，混凝土 7 天至 28 天的抗壓強度大致改變不大，若添加 30 % (水泥重量比) 粉煤飛灰時，則出現降低的趨勢。

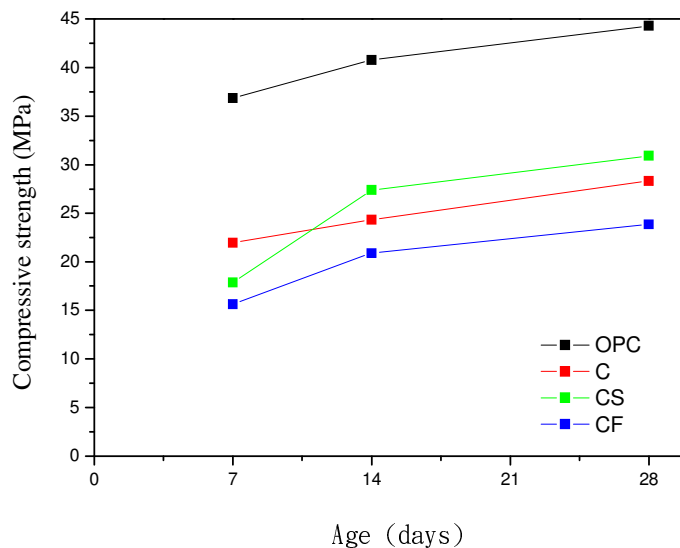


圖 5-11 陶瓷粗粒料混凝土抗壓強度

(資料來源：本研究整理)

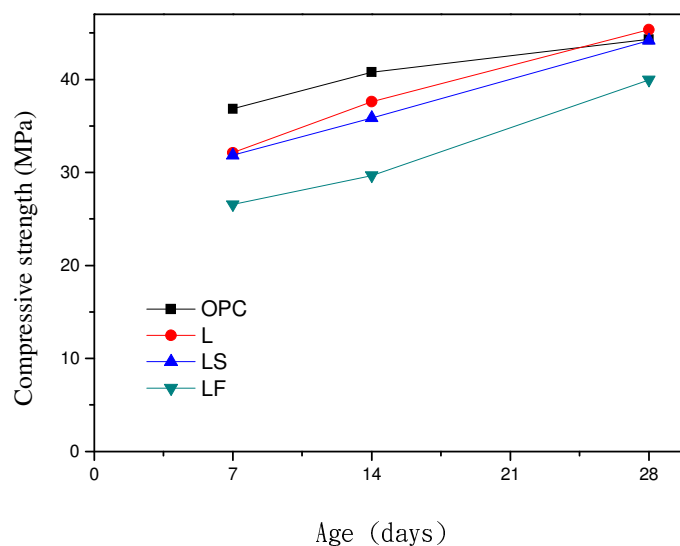


圖 5-12 輕質粗粒料混凝土抗壓強度

(資料來源：本研究整理)

熱傳導改良混凝土熱傳導係數試驗結果

表 5-14 及圖 5-13 為熱傳導改良混凝土的熱傳導係數試驗結果，顯示普通混凝土、陶瓷粗粒料混凝土和輕質粗粒料混凝土之間的熱傳導係數差異甚大。

表 5-14 熱傳導改良混凝土熱傳導係數試驗結果(W/m.K)

編號 養護天數	OPC	C	CS	CF	L	LS	LF
7	2.12	1.2	1.15	1.12	0.957	0.944	0.911
14	2.14	1.24	1.17	1.16	0.981	0.954	0.934
28	2.23	1.27	1.21	1.2	1	0.987	0.989

(資料來源：本研究整理)

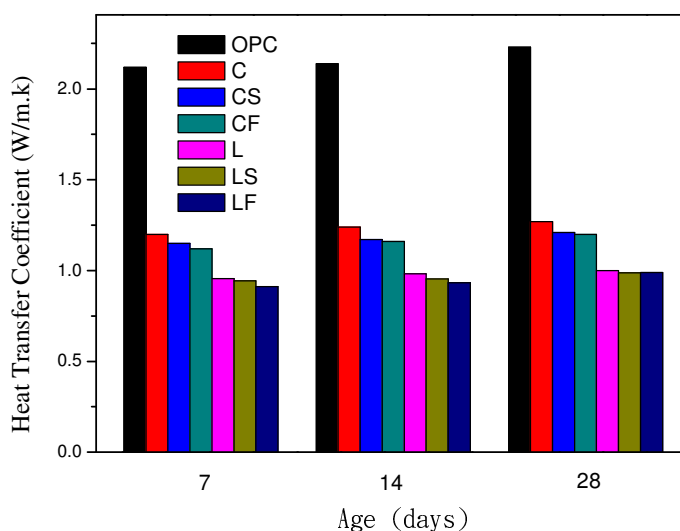


圖 5-13 熱傳導改良混凝土熱傳導係數

(資料來源：本研究整理)

養護齡期、粗粒料及礦物摻料對混凝土熱傳導係數之影響

圖 5-14 顯示，混凝土的熱傳導係數會隨養護齡期的增加而產生些許遞增的現象，亦可以發現礦物摻料的添加對混凝土的熱傳導係數也是有影響的。但就整體而言，粗粒料的改變對於混凝土熱傳導係數的影響最大。圖中很明顯說明，熱傳導係數可依粗粒料種類(天然粗粒料、陶瓷粗粒料、輕質粗粒料)分為 3 個區塊。

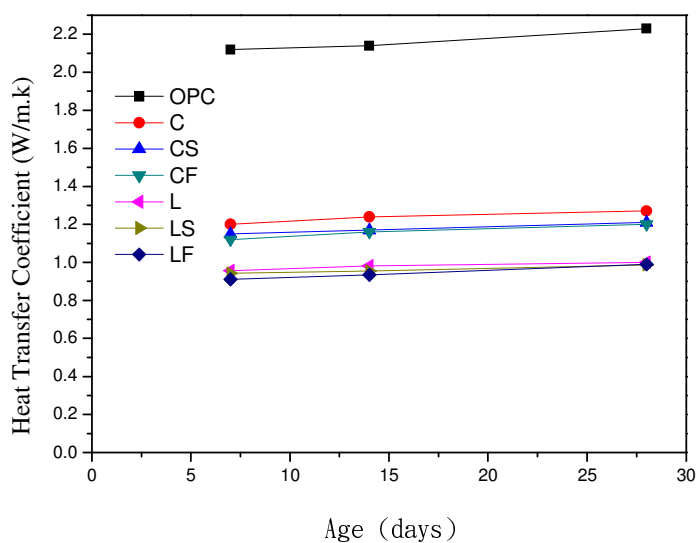


圖 5-14 不同養護齡期混凝土熱傳導係數

(資料來源：本研究整理)

圖 5-15 為不同種類混凝土的熱傳導係數，可發現陶瓷粗粒料混凝土可降低普通混凝土約 43%的熱傳導係數，而輕質粗粒料混凝土可降低混凝土約 56%的熱傳導係數。

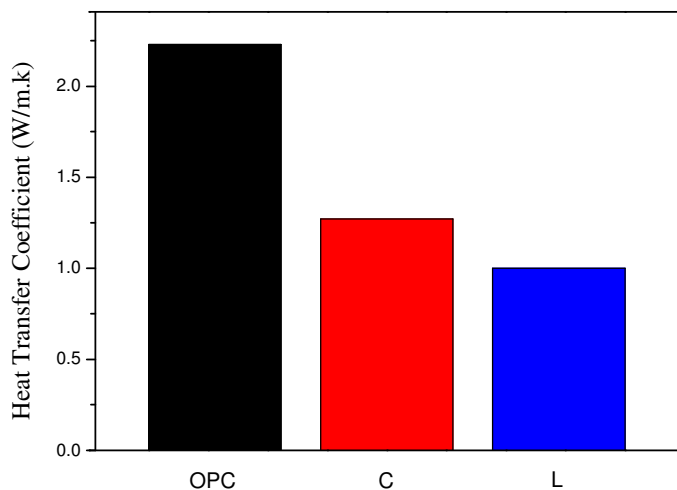


圖 5-15 混凝土熱傳導係數

(資料來源：本研究整理)

5-2-2 試驗案例二^[66]

5-2-2-1 試驗材料

拌合用水：請參閱 5-1-1-1。

水泥：請參閱 5-1-1-1。

矽砂：外觀為不規則顆粒，如圖 5-16 所示，平均粒徑為 70~105 μm ，比重為 2.64。



圖 5-16 矽砂

(資料來源：本研究整理)

(1) 矽藻土(Diatomite)

矽藻土的外觀為白色粉狀，比重為 2.33，如圖 5-17 所示。透過 SEM 影像可發現其微結構是中空圓柱體，外直徑約為 10~18 μm ，內直徑約為 2~8 μm ，圓柱高約 10~18 μm ，如圖 5-18 所示。經由 EDS 可得知其主要元素為 Si 及 O，如表 5-15 所示。透過 XRD 成分分析可得知其化合物成分為 SiO_2 ，如圖 5-19 所示。

表 5-15 矽藻土元素分析(EDS)

元素	百分比 (wt.%)
Si	48.65
Al	0.78
Na	1.17
O	49.40
Total	100.00

(資料來源：內政部建築研究所 2008)



圖 5-17 矽藻土粉末

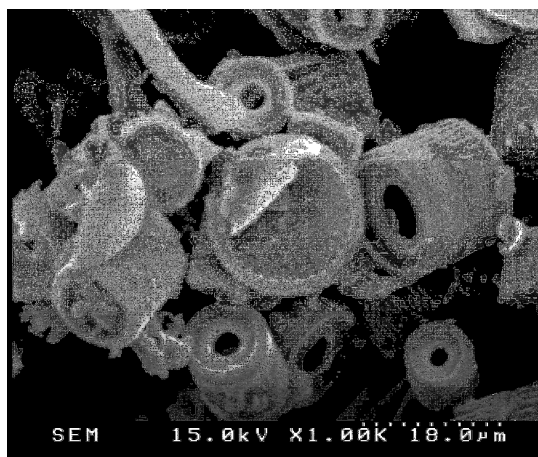


圖 5-18 矽藻土微觀圖

(資料來源：內政部建築研究所 2008)

(資料來源：內政部建築研究所 2008)

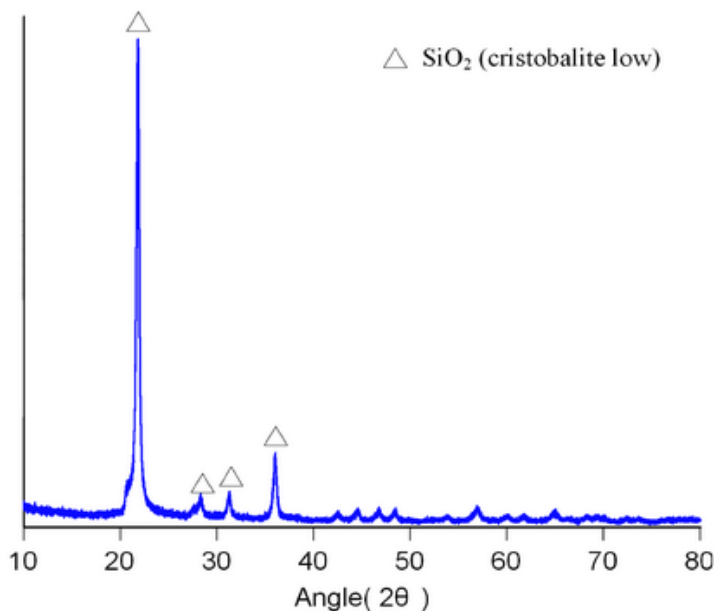


圖 5-19 矽藻土成分分析

(資料來源：內政部建築研究所 2008)

(2) 蒙脫土(Montmorillonite)

蒙脫土的外觀為米白色粉狀，比重為 2.6，如圖 5-20 所示。透過 SEM 影像可發現其微結構為不規則顆粒，平均粒徑大小約為 20~36 μm ，如圖 5-21 所示。由 EDS 得知其主要元素為 Si、O 及少量 Al 及微量 Mg，如表 5-16 所示。透過 XRD 成分分析可得知其化合物成分為 SiO_2 及 $\text{Al}_2 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ，如圖 5-22 所示。

表 5-16 蒙脫土元素分析(EDS)

元素	百分比(wt.%)
Si	39.22
Al	8.24
Mg	0.69
O	51.85
Total	100.00

(資料來源：內政部建築研究所 2008)



圖 5-20 蒙脫土粉末

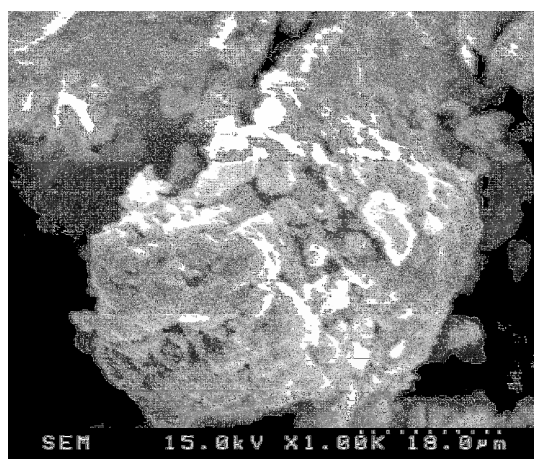


圖 5-21 蒙脫土微觀圖

(資料來源：內政部建築研究所 2008)

(資料來源：內政部建築研究所 2008)

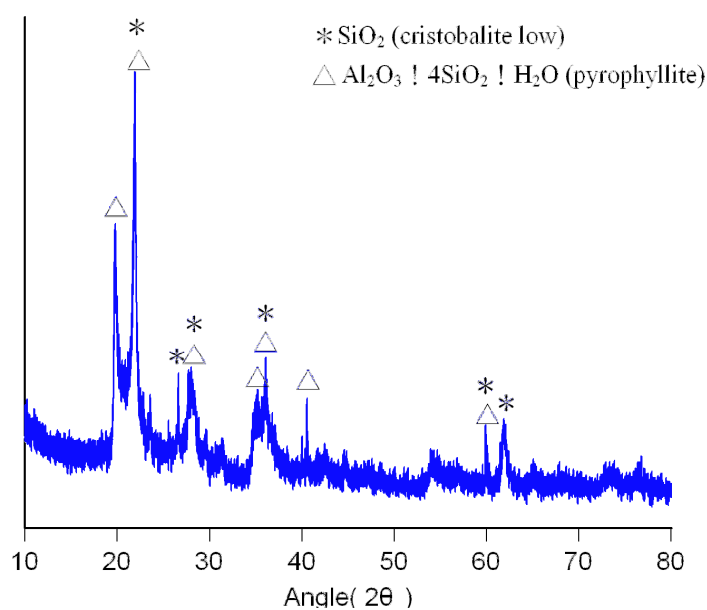


圖 5-22 蒙脫土成分分析

(資料來源：內政部建築研究所 2008)

(3) 海泡石(Sepiolite)

海泡石外觀為白色長條狀，比重為 3.33，如圖 5-23 所示。透過 SEM 影像可發現其微結構為纖維狀，平均粒徑大小約為 10~20 μm，如圖 5-24 所示。由 EDS 可得知其主要元素為 Si、O 及少量 Mg 還有微量 Al，如表 5-17 所示。透過 XRD 成分分析可得知其化合物成分為 $\text{CaMgSiO}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ 、 SiO_2 、 MgSiO_3 、 $\text{MgSi}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ，如圖所示 5-25。

表 5-17 海泡石元素分析(EDS)

元素	百分比(wt.%)
Si	24.45
Al	0.40
Ca	15.58
Mg	11.40
O	48.17
Total	100.00

(資料來源：內政部建築研究所 2008)



圖 5-23 海泡石粉末

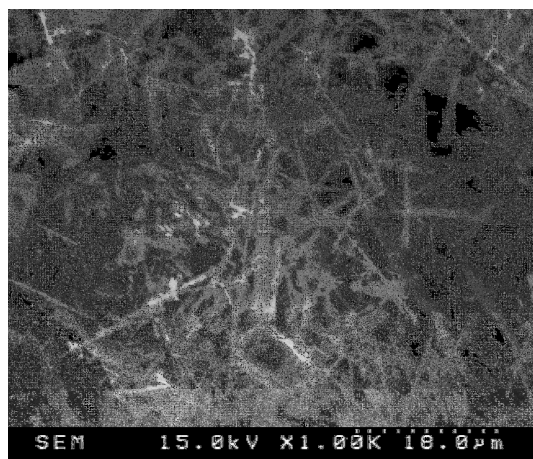


圖 5-24 海泡石微觀圖

(資料來源：內政部建築研究所 2008)

(資料來源：內政部建築研究所 2008)

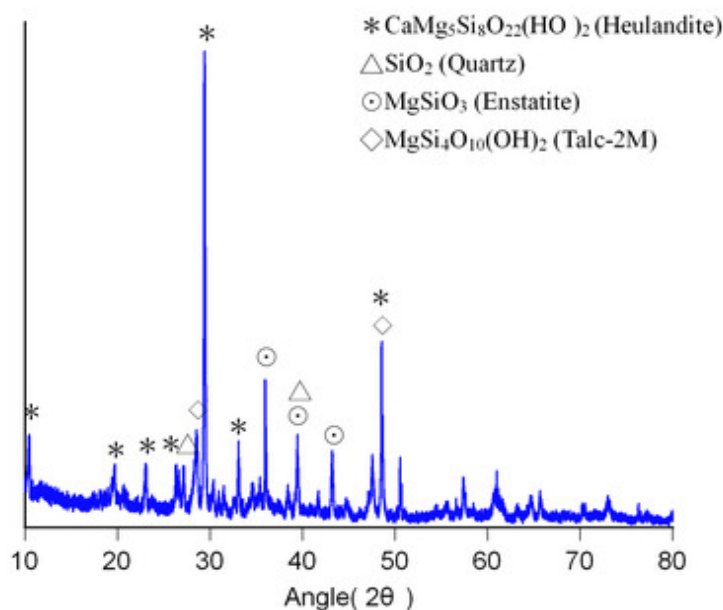


圖 5-25 海泡石成分分析

(資料來源：內政部建築研究所 2008)

(4) 沸石(Zeolite)

沸石外觀為綠色粉狀材料，比重為 2.16，如圖 5-26 所示。透過 SEM 影像可發現其微結構為不規則顆粒，平均顆粒大小約 4~9 μm ，如圖 27 所示。由 EDS 得知其主要元素為 Si、O 及微量 Mg、Na、Ca、K，如表 5-18 所示。透過 XRD 成分分析可得知其化合物成分為 $\text{CaAl}_2\text{Si}_7\text{O}_{18}$ 、 SiO_2 ，如圖 28 所示。

表 5-18 沸石元素分析(EDS)

元素	百分比(wt.%)
Si	36.71
Al	7.27
Mg	0.53
O	49.03
Na	1.35
Ca	3.18
K	1.94
Total	100.00

(資料來源：內政部建築研究所 2008)



圖 5-26 沸石粉末

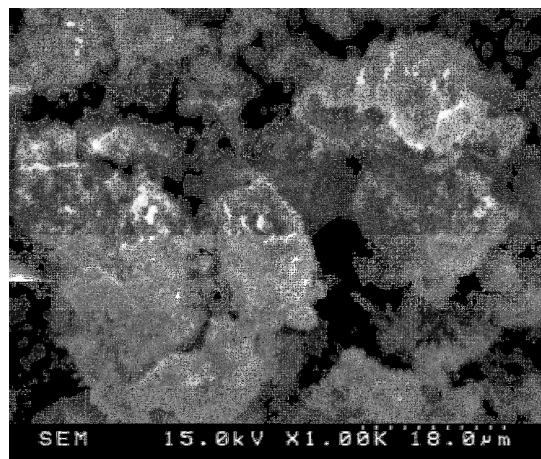


圖 5-27 沸石微觀圖

(資料來源：內政部建築研究所 2008)

(資料來源：內政部建築研究所 2008)

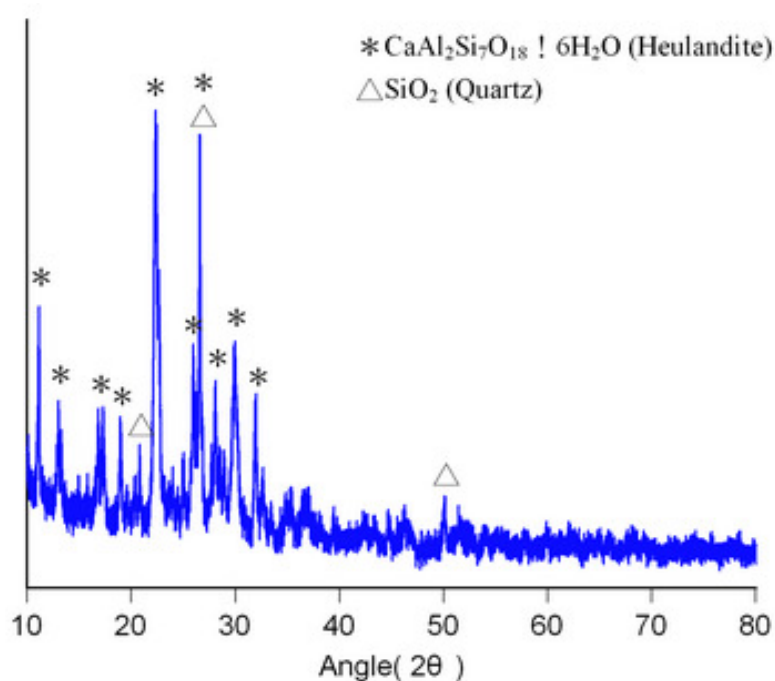


圖 5-28 沸石成分分析

(資料來源：內政部建築研究所 2008)

5-2-2-2 試驗配比

水泥砂漿的水膠比為 0.55，水泥與粒料比為 1:1，以無機礦物調濕摻料(矽藻土、海泡石、蒙脫土、沸石)作為主要試驗變數，其添加比例為水泥重量的 15%，詳如表 5-19 所示。

表 5-19 調濕混凝土配比(kg/m³)

編號	水	水泥	矽藻土	海泡石	蒙脫土	沸石	粒料
OPM	441.3	802.4	0	0	0	0	802.4
D	419.6	763	114.4	0	0	0	763
M	421.8	766.9	0	115	0	0	766.9
s	425.8	774.2	0	0	116.1	0	774.2
Z	418	760.1	0	0	0	114	760.1

(資料來源：內政部建築研究所 2008)

編號說明：D 表示矽藻土；

M 表示海泡石；

s 表示蒙脫土；

Z 表示沸石；

5-2-2-3 試驗方法

吸/放濕試驗 (Moisture-adsorption/desorption test)

本試驗係依照 JIS A 1470-1 規範進行，將 200 mm × 200 mm × 30 mm 試體放入乾燥器中進行乾燥，該乾燥器內置配製好的飽和鹽溶液，不同組的飽和鹽溶液對應不同的相對濕度，詳如表 5-20 所示，試驗裝置如圖 5-29 所示。

(1) 吸濕試驗

試驗從相對濕度為 33% 開始，首先將試體放入已調好濕度的乾燥器中，待吸濕達到平衡後，遞增相對濕度繼續吸濕，直到在相對濕度為 93% 下吸濕平衡，試驗結束。

(2) 放濕試驗

試體在相對濕度 93% 開始吸濕，待吸濕平衡達到後，在相對濕度 75% 下放濕。放濕平衡後，遞減相對濕度繼續放濕，直到在相對濕度為 33% 下放濕平衡，放濕試驗結束。

表 5-20 飽和鹽類及相對濕度

使用鹽類	相對濕度(%)
MgCl ₂ · 6H ₂ O	33
K ₂ CO ₃	43
Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	53
KI	69
NaCl	75
KCl	85
KNO ₃	93

(資料來源：內政部建築研究所 2008)



圖 5-29 吸(放)濕試驗裝置

(資料來源：內政部建築研究所 2008)

SEM微觀結構分析

掃描式電子顯微鏡：

本研究使用日本 HITACHI 公司生產之 S-4800 型掃描式電子顯微鏡觀察微觀結構，該儀器最高放大倍率可達 10 萬倍，目的在瞭解永續混凝土性能改善的機理。本設備利用電場發射電子束撞擊試片激發出訊號，經由訊號放大器再送至陰極映像管中，再藉由螢光幕呈現試體微觀晶相。

能量分散光譜儀：

能量分散光譜儀 (Energy Dispersive Spectroscopy, EDS) 附屬於 SEM 設備中，採用逆偏壓的矽 (鋰) 偵測器。由於每一入射的高能 X 光會放出大部分能量而形成電子-電洞對，外加電壓可使得電子及電洞移動產生脈動，多頻道分析

器紀錄此電壓脈動並產生尖峰值，再由尖峰值比對材料之元素成份，希望藉由元素的分佈來瞭解永續混凝土性能改善的機理。



圖 5-30 掃瞄式電子顯微鏡(S-4800)

(資料來源：本研究整理)

微觀結構分析之 SEM 觀察係參照下列步驟進行:

- (1) 裁切取樣試片，試片尺寸約為 $10 \times 10 \times 3$ mm 大小。
- (2) 將試片置入 80°C 恆溫箱內烘烤 24 小時，進行乾燥去除水氣程序。
- (3) 將試片乾燥處理並預抽真空，並濺鍍金鉑以便導電。
- (4) 置入試體於電子顯微鏡內並進行抽真空程序。
- (5) 場發射電子束掃描試片表面，顯像觀察並且照相。

X 光繞射分析(XRD)

本研究使用 PANalytical 所生產的 X 光繞射分析儀(型號：X'Pert Pro, MPD)，該儀器所使用的靶材為銅靶，外觀如圖 5-31 所示。X 光繞射分析係利用 X 光照射在試片，繞射後的 X 光會沿著與入射角成 2θ 夾角之圓錐面射出，藉由紀錄不同角度時的繞射強度可繪製 2θ -強度圖。由 Bragg's law 可知，當 $\lambda = 2d\sin\theta$ 時會產生建設性干涉，因而會有繞射峰產生。不同的化合物均有不同的繞射結果產生，所以可利用比對高峯值發生的位置來判別試片內的化合物成分。本試驗的目的亦是希望藉由判斷相的種類來瞭解永續混凝土性能改善的機理。

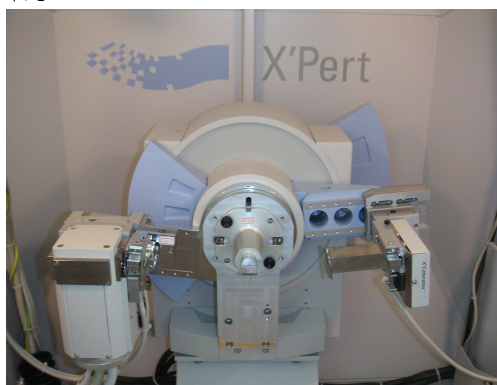


圖 5-31 X 光繞射分析儀

(資料來源：本研究整理)

X 光繞射分析係參照下列步驟進行：

- (1) 均勻選取具代表性之試片粉末約 1 g。
- (2) 將試樣置入 100±5°C 恆溫箱，進行乾燥去除水氣程序 24 小時以上。
- (3) 將試樣黏置於玻璃片上並定位於 XRD 分析儀器中，以繞射角度 10°~80°、掃描速率 3 sec./0.05° 進行試驗。
- (4) 將分析後之 X 光繞射強度圖(intensity diagram)與電腦軟體內建化合物資料庫之化合物尖峰值(peak)比對。

5-2-2-4 試驗結果與討論

調濕混凝土的抗壓強度

表 5-21 列出調濕混凝土的抗壓強度，整理後如圖 5-32 所示，可發現添加 15%(水泥重量比)的矽藻土及蒙脫土可增加混凝土的抗壓強度，但添加 15%(水泥重量比)的海泡石及沸石則會降低混凝土的抗壓強度。

表 5-21 調濕混凝土的抗壓強度(MPa)

編號 養護天數	OPM	D	M	s	Z
7	36.06	38.54	35.85	49.27	28.92
14	39.11	44.24	38.21	51.72	30.65
28	44.48	53.29	42.91	62.88	31.26

(資料來源：內政部建築研究所 2008)

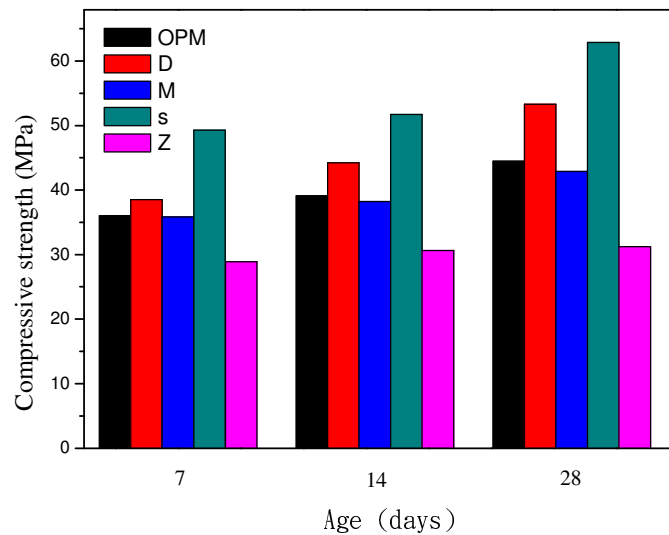


圖 5-32 調濕混凝土不同配比下的抗壓強度

(資料來源：內政部建築研究所 2008)

圖 5-33 顯示，調濕混凝土與普通混凝土一樣，抗壓強度會隨著養護齡期而增加。

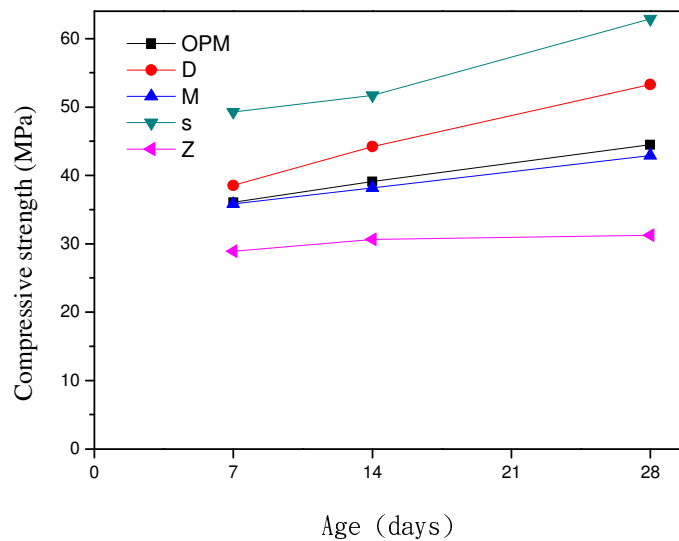


圖 5-33 調濕混凝土不同養護齡期下的抗壓強度

(資料來源：內政部建築研究所 2008)

由圖 5-34 得知，添加 15%(水泥重量比)的蒙脫土和矽藻土可分別增加混凝土 41% 與 20% 的抗壓強度，而海泡石及沸石則會分別降低混凝土的抗壓強度約 4% 及 30%。

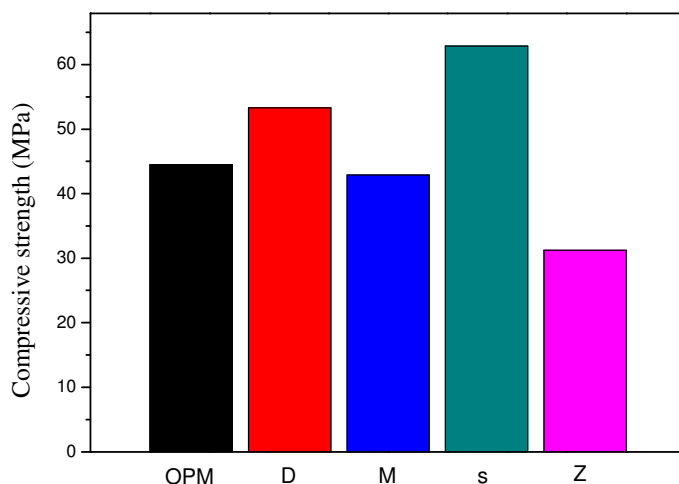


圖 5-34 調濕混凝土養護 28 天後的抗壓強度

(資料來源：內政部建築研究所 2008)

調濕混凝土吸(放)濕試驗結果

表 5-22 為調濕混凝土的吸濕試驗結果，整理後如圖 5-35 所示。結果顯示，當混凝土中添加 15%(水泥重量比)的無機調濕材料時，混凝土吸濕的效果在不同相對濕度的情況下都是有幫助的，其中以編號 M 的海泡石及編號 Z 的沸石在相對濕度 33 %~93 %間具有明顯效果。

表 5-22 調濕混凝土的吸濕試驗結果

編號	含濕量(g)					含濕率(%)				
OPM	5.4	14.4	43.5	58.9	75	0.27	0.72	2.18	2.95	3.75
D	6.1	16.4	47.7	65.2	82.3	0.3	0.82	2.38	3.26	4.11
M	26.5	37.7	52.9	69.6	79.1	1.33	1.89	2.65	3.48	3.96
s	6.7	17.1	47.5	66.4	84.8	0.34	0.86	2.38	3.32	4.24
Z	26.2	35.4	46.6	65.9	80.8	1.31	1.77	2.33	3.29	4.04
RH(%)	33%	53%	69%	85%	93%	33%	53%	69%	85%	93%

(資料來源：內政部建築研究所 2008)

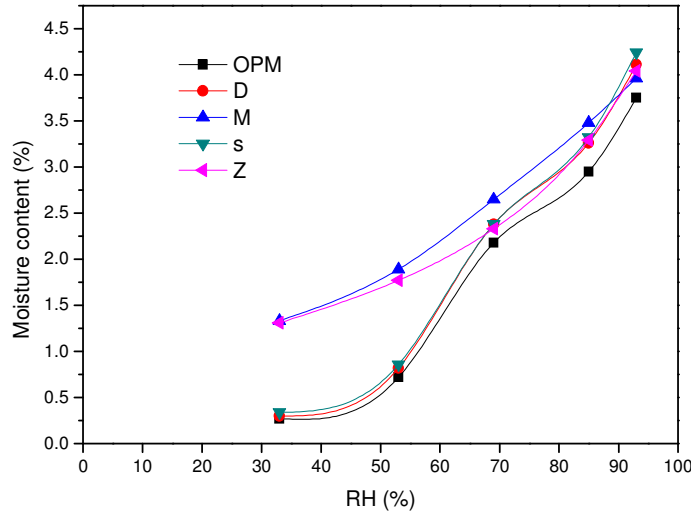


圖 5-35 含濕率(吸濕)與相對濕度(RH)的關係

(資料來源：內政部建築研究所 2008)

假設室內相對濕度為 69%，透過圖 5-36 可得知，當混凝土中添加 15%(水泥重量比)的無機調濕材料時，依序可增加 9%、22%、9%、7%的吸濕效果。

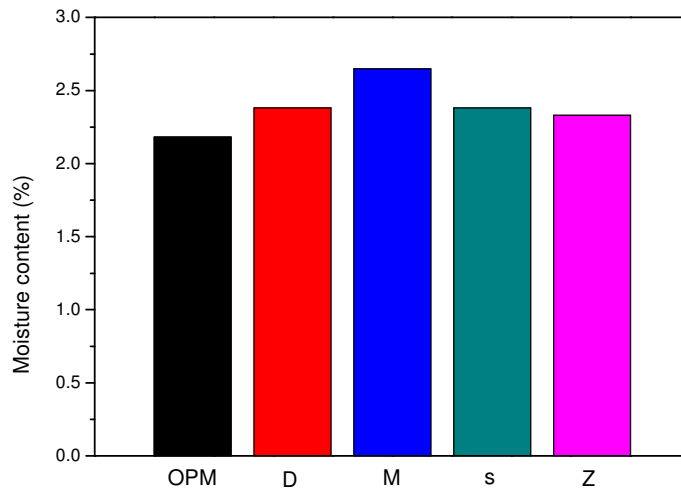


圖 5-36 調濕混凝土在相對溼度 69%環境下的含濕率

(資料來源：內政部建築研究所 2008)

表 5-23 為調濕混凝土放濕試驗的結果，整理後如圖 5-35 所示，可以發現當混凝土中添加 15%(水泥重量比)的無機調濕材料時，混凝土放濕的功能在不同相對濕度的情況下皆有增加的效果，其中以編號 M 的海泡石及編號 D 的矽藻土最明顯。

表 5-23 調濕混凝土放濕試驗結果

編號	含濕量(g)					含濕率(%)				
OPM	75	74.7	72.6	69.7	60.7	3.75	3.73	3.63	3.48	3.03
D	82.3	82	79.6	76.6	67.1	4.11	4.1	3.98	3.83	3.35
M	79.1	78.8	75.6	73	63.5	3.96	3.94	3.78	3.65	3.18
s	84.8	83.9	81.1	77.3	67.2	4.24	4.19	4.06	3.86	3.36
Z	80.8	79.79	76.39	73.49	62.59	4.04	3.99	3.82	3.67	3.13
RH(%)	93%	85%	69%	53%	33%	93%	85%	69%	53%	33%

(資料來源：內政部建築研究所 2008)

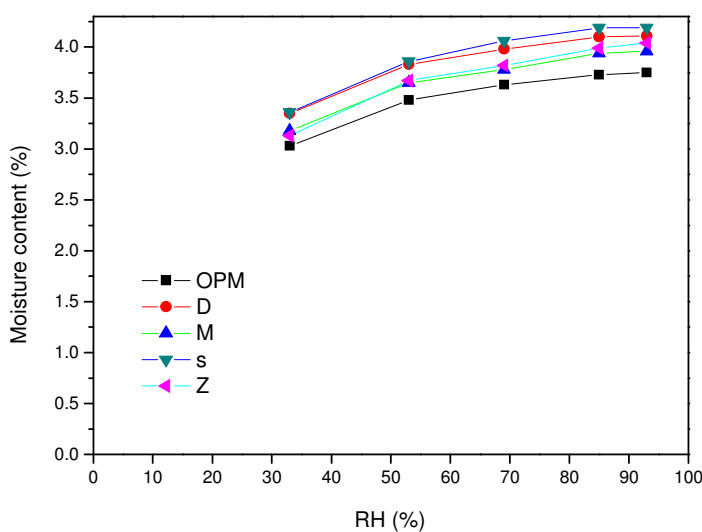


圖 5-37 含濕率(吸濕)與相對濕度(RH)關係

(資料來源：內政部建築研究所 2008)

假設室內相對濕度為 33%，透過圖 5-38 可得知，當混凝土中添加 15%(水泥重量比)無機調濕材料時，依序可增加 11%、5%、11%、3%的放濕效果。

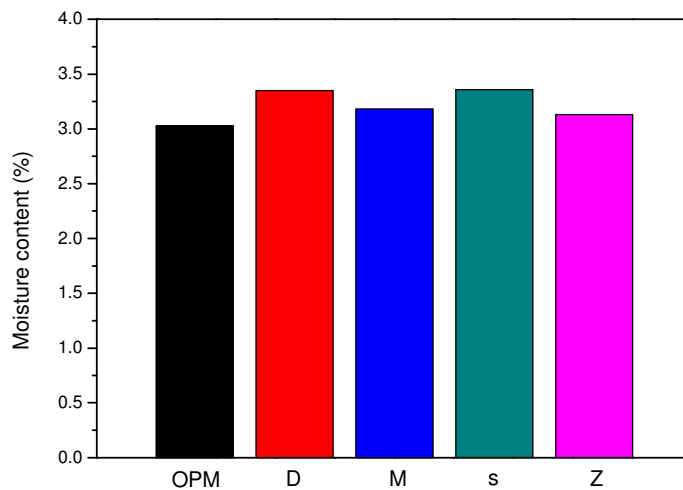


圖 5-38 調濕混凝土在相對溼度 33% 環境下的含濕率

(資料來源：內政部建築研究所 2008)

第三節 耐久混凝土

「耐久性」顧名思義會讓人首先聯想到使用壽命，所以材料之耐久性意謂著材料的使用年限。ACI Committee 201 對混凝土耐久性的定義如下：耐久性係指其抵抗自然風化作用、化學及有害物質侵蝕、磨耗及其它劣化過程的能力 [67]。

混凝土是一種具多孔隙的複合式材料，容易因體積膨脹收縮現象而產生內應力，亦可能許多外界的有害因子藉由孔隙入侵導致混凝土的耐久性降低。混凝土耐久性的檢驗方法中，最常見的有快速氯離子穿透試驗法(Rapid Chloride Permeability Test, RCPT)、圍塘試驗法(Ponding test)，這兩試驗法主要是以電能驅動和自然擴散兩種不同的傳輸機制來檢測混凝土內部結構的緻密程度。由於 RCPT 按照 ASTM C1202 規定只需試驗時間 6 小時，而圍塘試驗法依照 AASHTO T259 的建議至少需 90 天的長期浸置才可用以評估混凝土內部劣化，分析也較繁雜，因此本計畫僅使用 RCPT 及透水試驗法來說明案例中混凝土的耐久性。

5-3-1 試驗案例

5-3-1-1 試驗材料

稻殼灰：在不同溫度條件下燃燒時，稻殼灰外觀上會有不同的顏色變化，如圖 5-39 所示。本計畫所採用的稻殼灰屬二次再利用的副產品，原一次再利用時主要作為造紙的燃料，燃燒的平均溫度約 450°C~650°C。稻殼

灰的比重為 1.98，化學及物理性質詳列於表 5-3 與表 5-4。

拌合用水：請參閱 5-1-1-1。

天然粗粒料：請參閱 5-1-1-1。

天然細粒料：請參閱 5-1-1-1。

水泥：請參閱 5-1-1-1。

飛灰：請參閱 5-1-1-1。

水淬高爐石粉：請參閱 5-1-1-1。

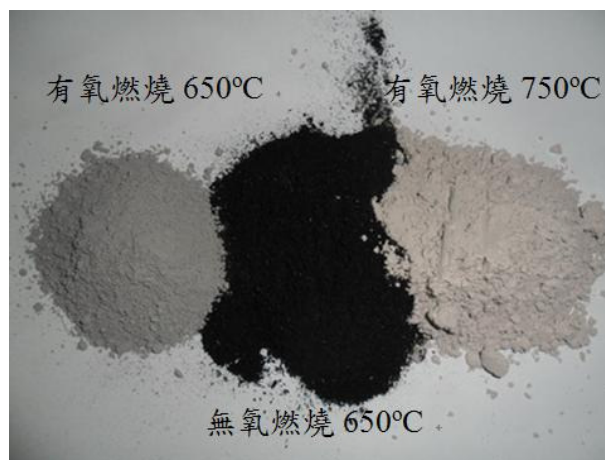


圖 5-39 不同燒結溫度的稻殼灰

(資料來源：本研究整理)

5-3-1-2 試驗配比

本計畫主要選擇水膠比 0.35 及 0.65 兩種差異較大的配比來進行比較，礦物摻料選擇飛灰、水淬高爐石粉、稻殼灰等並依配比個別取代水泥重量的 30%，為了考量工作度，部份配比中添加強塑劑，配比設計如表 5-24 所示。

表 5-24 耐久混凝土配比(kg/m^3)

編號	水膠比	水	水泥	飛灰	水淬高爐石粉	稻殼灰	粗粒料	細粒料	藥劑
C3		220	629	-	-	-	841	585	1.89
F3	0.35	220	440	189	-	-	809	562	1.89
S3		220	440	-	189	-	836	581	1.89
R3		220	440	-	-	189	782	544	6.29
C6		220	338	-	-	-	983	683	-
F6	0.65	220	237	102	-	-	964	670	-
S6		220	237	-	102	-	978	680	-
R6		220	237	-	-	102	952	661	1.69

(資料來源：本研究整理)

編號說明：C 表示普通混凝土；

F 表示飛灰；

S 表示水淬高爐石粉；

R 表示稻殼灰；

數字表示水膠比 0.35(3)、0.65(6)

5-3-1-3 試驗方法

快速氯離子穿透試驗(RCPT)

本試驗依據 ASTM C1202 規定之方法進行試驗，圓柱試體在水中分別養護至適當齡期取出後再以混凝土切割機切割，取試體中央部分橫向尺寸(D)為 10 cm 及縱向尺寸(H) 5 cm 之兩試片進行氯離子快速滲透試驗，切割完成後將試片烘乾並靜置 24 小時，接著使用防水材料將試片四周塗封並置入真空室中，利用真空幫浦抽氣使得真空度達到 1 mmHg 大氣壓並保持真空度 3 小時。之後，打開止水閥讓已沸騰過的蒸餾水(須冷卻後)流入真空室直到蒸餾水蓋過試片，再打開真空幫浦開始續抽且必須續抽一個小時以上。關掉真空幫浦後打開真空室使空氣進入真空室並取出試片浸置水中 18 ± 2 小時，接著將試片安裝於電滲槽中。其中陰極槽放入 3% 之氯化鈉溶液，陽極槽放入 0.3N 之氫氧化鈉溶液，確認試片與電滲槽之間不漏水後即完成整個電路的配置，電滲試驗的配置如圖 5-40 所示。

試驗時外加 60V 的定直流電壓，通電後便可得到第 0 小時的電流值，之後每半個

小時記錄一次直到 6 小時後試驗完成，代入所記錄每半個小時的電流值於以下公式便可計算出總通過電量：

$$Q = 900(I_{00} + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360}) \quad (5-4)$$

式中，

Q：總通過電量(coulombs)

I_0 ：外加電壓後初始的電流值(amperes)

I_t ：外加電壓後第 t 分鐘的電流值(amperes)

若試體的直徑非 9.5 cm，則依據 ASTM C1202 規範必須修正總通過電量公式：

$$Q_s = Q_x \times \left(\frac{9.5}{X}\right)^2 \quad (5-5)$$

式中： Q_s ：試體直徑為 9.5cm 之總通過電量(coulombs)

Q_x ：試體直徑為 x cm 之總通過電量(coulombs)

X：試體直徑(cm)

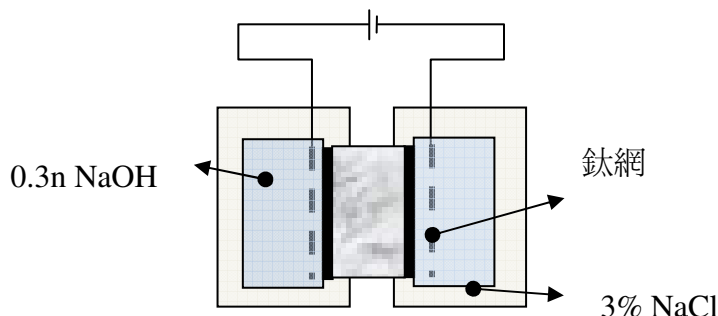


圖 5-40 RCPT 試驗配置

(資料來源：本研究整理)

5-3-1-4 試驗結果與討論

耐久混凝土抗壓強度試驗結果

表 5-25 為耐久混凝土抗壓強度的試驗結果，整理後於圖 5-41 及圖 5-42 分別顯示水膠比 0.65 及 0.35 試體的抗壓強度。

表 5-25 耐久混凝土抗壓強度試驗結果(MPa)

編號 養護天數	C6	S6	F6	R6	C3	S3	F3	R3
7	22.71	20.01	11.6	7.07	43.96	41.88	26.99	19.47
14	26.71	26.12	15.2	11.34	48.83	47.51	32.78	22.5
28	28.33	28.52	18.85	15.15	51.68	51.69	41.99	27.75

(資料來源：本研究整理)

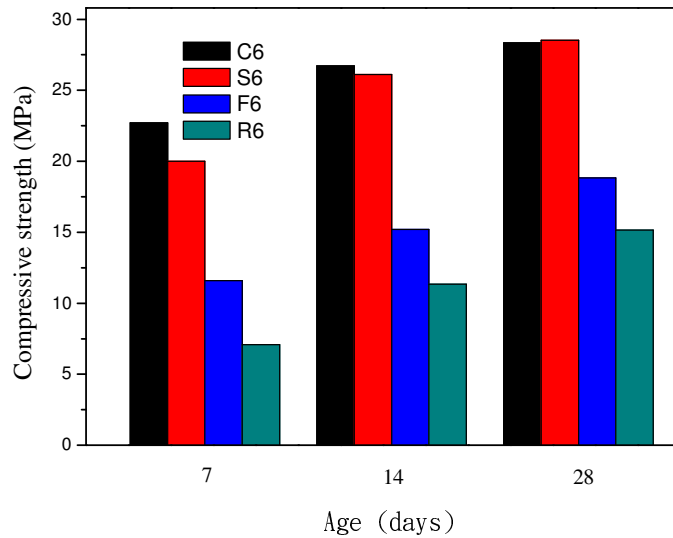


圖 5-41 不同養護齡期抗壓強度(水膠比 0.65)

(資料來源：本研究整理)

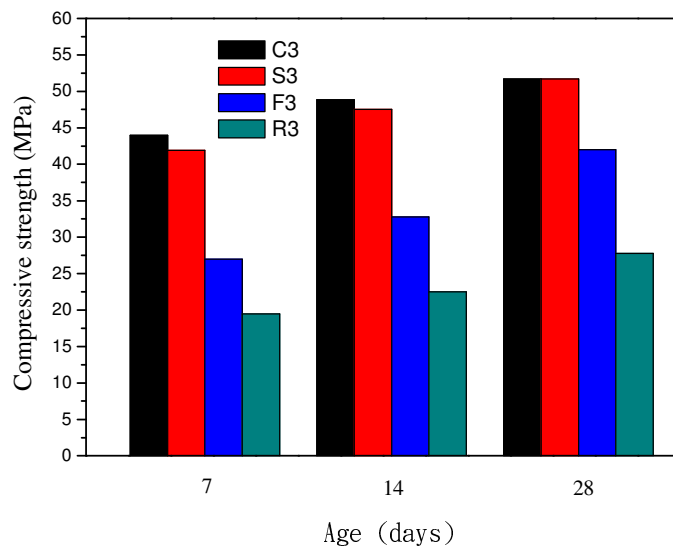


圖 5-42 不同養護齡期抗壓強度(水膠比 0.35)

(資料來源：本研究整理)

RCPT 試驗結果

圖 5-43 與圖 5-44 為 28 天 RCPT 的試驗結果，可發現混凝土會因礦物摻料的種類而改變並呈現出不同的成長趨勢。

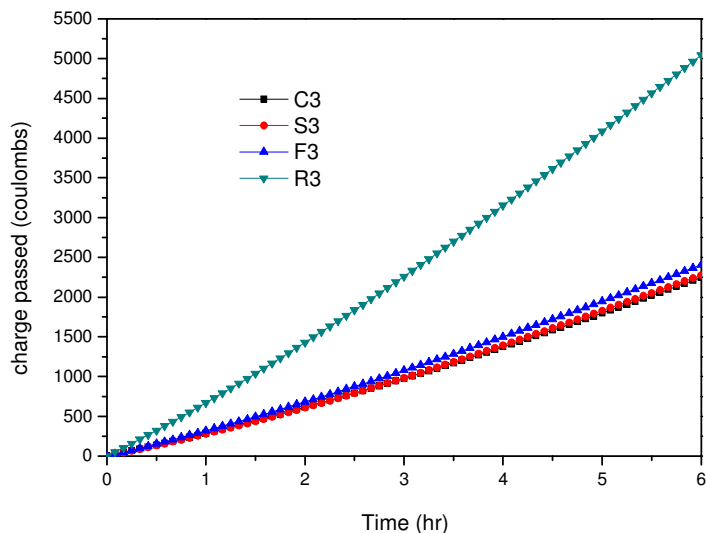


圖 5-43 累積通過電量與通電時間關係圖(水膠比 0.35)

(資料來源：本研究整理)

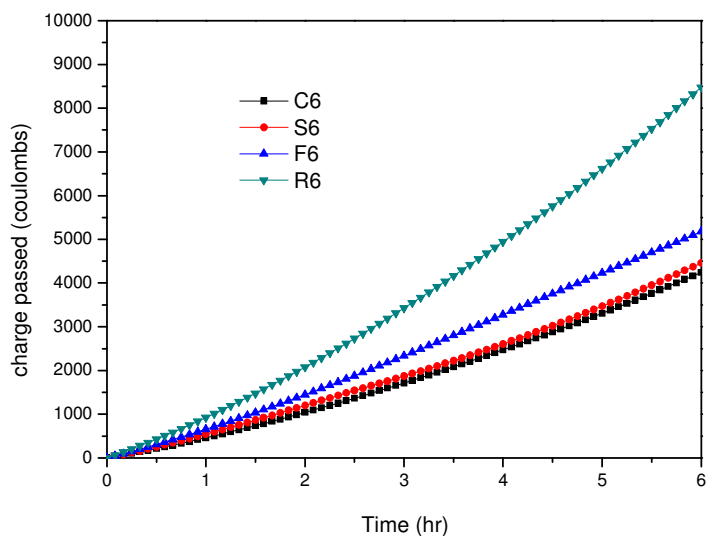


圖 5-44 累積通過電量與通電時間關係圖((水膠比 0.65)

(資料來源：本研究整理)

由圖 5-45 可發現，在水膠比 0.65 的條件下，6 小時所累積通過總電量相較於水膠比 0.35 的條件下高了將近 2 倍，表示水膠比的確影響 6 小時累積總通過電量。

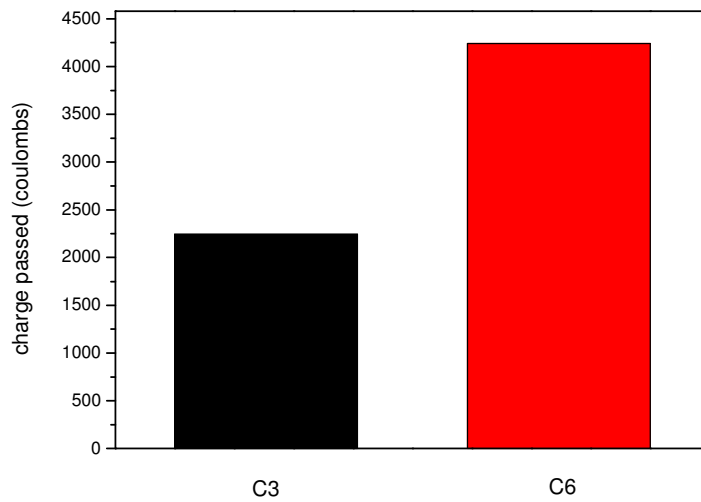


圖 5-45 不同水膠比 6 小時累積總通電量

(資料來源：本研究整理)

圖 5-46 為水膠比 0.35 的混凝土於添加不同種類的礦物摻料時的 6 小時累積總電量，可發現水膠比 0.35 的普通混凝土相較於其它三類混凝土有較低的總通電量，依編號次序個別減少 1 %、7 % 和 1.2 倍的 6 小時累積總電量。

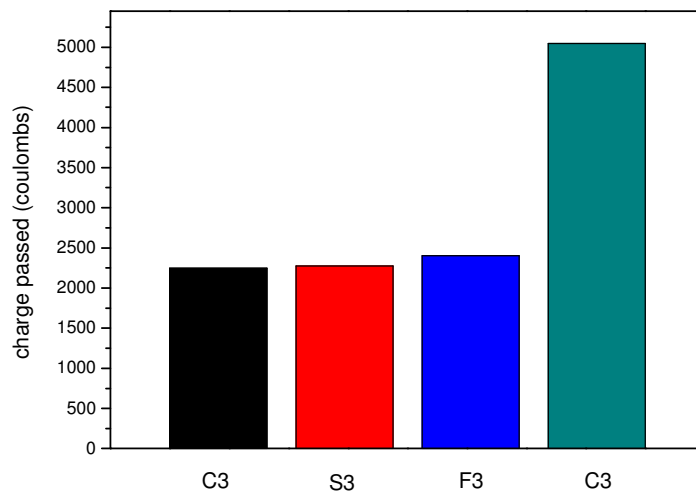


圖 5-46 6 小時累積總電量(水膠比 0.35)

(資料來源：本研究整理)

圖 5-47 為水膠比 0.65 的混凝土添加不同種類的礦物摻料時的 6 小時累積總電量，可發現水膠比 0.65 的普通混凝土相較於其他三類混凝土有較低的總通電量，依編號次序個別減少 5 %、22 % 和 2 倍的 6 小時累積總電量。

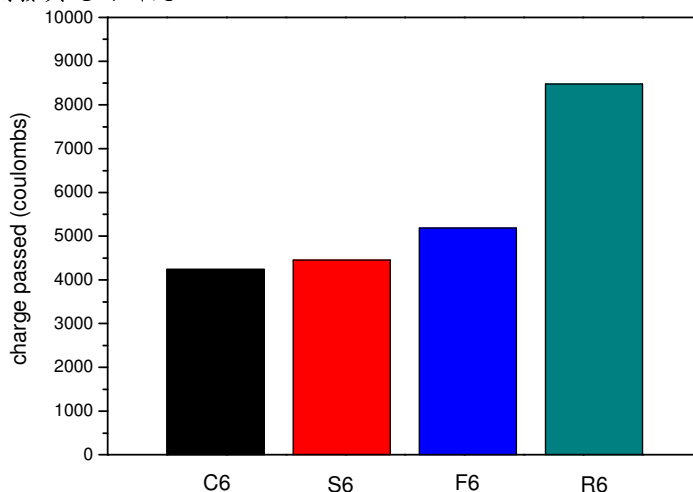


圖 5-47 6 小時累積總電量(水膠比 0.65)

(資料來源：本研究整理)

耐久性評估

AASHTO T277 利用累積總電量來評估混凝土的氯離子穿透能力，共分成高、中等、低、非常低或微量等五級，可據此來解釋混凝土的緻密性與耐久性，評估表如表 5-26 所示。

表 5-26 累積通過電量對氯離子穿透指標評估表

Charge Passed (Coulombs)	Chloride Permeability	Typical of
>4,000	High	High W/C ratio (>0.60) conventional PCC
2,000–4,000	Moderate	Moderate W/C ratio (0.40–0.50) conventional PCC
1,000–2,000	Low	Low W/C ratio (<0.40) conventional PCC
100–1,000	Very Low	Latex-modified concrete or internally-sealed concrete
<100	Negligible	Polymer-impregnated concrete, Polymer concrete

(資料來源： AASHTO T277, 2006)

圖 5-48 為統整耐久混凝土 6 小時的累積總電量，可根據表 5-26 的規定加以說明並整理如表 5-27 所列。

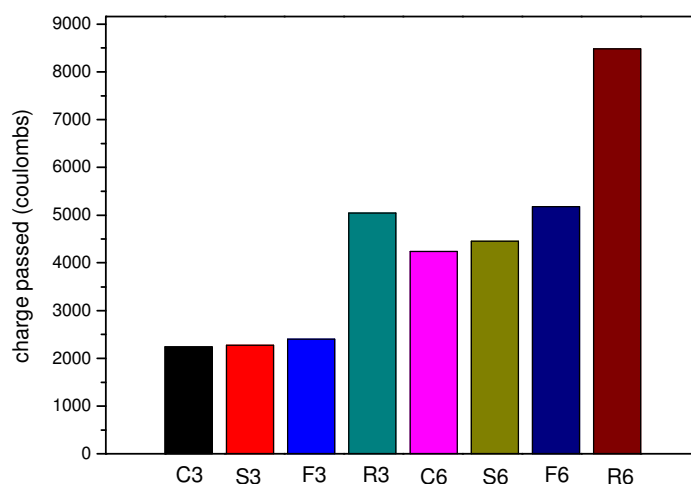


圖 5-48 耐久混凝土 6 小時累積總電量

(資料來源：本研究整理)

由表 5-27 得知，水膠比 0.65 的試體皆屬高氯離子穿透，表示其緻密性與耐久性較低。水膠比 0.35 的部分普通混凝土與添加 30%(水泥重量比)水淬高爐石粉的混凝土屬於低氯離子穿透，表示其具有不錯的耐久性，但添加 30%(水泥重量比)粉煤飛灰的混凝土屬適中，添加 30%(水泥重量比)稻殼灰的混凝土則為高氯離子穿透，屬低耐久性，此結果大致與 AASHTO T277 中的參考樣本相吻合。

表 5-27 混凝土氯離子穿透指標

編號	C6	S6	F6	R6	C3	S3	F3	R3
評估指標								
高	●	●	●	●				●
中等							●	
低					●	●		
非常低								
微量								

(資料來源：本研究整理)

第四節 符合暴雨管理的透水混凝土

為了擁有更便捷的交通和高品質的生活水準，大量的混凝土、柏油鋪面及鋼筋混凝土結構逐漸取代了原有綠地。在滿足這些生活上種種慾望需求的同時，人們往往卻忽略對生態環境所造成的負面衝擊。大量的混凝土及柏油鋪面使得自然土壤嚴重缺乏透氣性及失去調節熱量與雨水滲透之能力，因此許多過度發展的城市逐漸喪失自然調節溫、溼度之能力。

降雨時，不透水鋪面容易積水而無法滲入地下，故使土壤失去涵養水分之功能。更一步說，大量的積水完全僅能倚賴排水系統排水，增加許多無謂的經濟負擔。透水混凝土的優點是具備高透水特性，但缺點是力學性質無法達到普通混凝土的強度標準。因此，透水混凝土在應用上主要偏向於強度要求較低的工程設施，如人行道、腳踏車道及廣場等。本研究在此舉一試驗案例，說明透水混凝土的透水與強度特性。

5-4-1 試驗案例^[68]

5-4-1-1 試驗材料

天然粒料：本試驗所使用之天然粒料最大粒徑為 0.48 cm，比重 2.67，外觀如圖 5-49 所示。

電弧爐碴：最大粒徑 0.95 cm，比重約 3.18，外觀如圖 5-50 所示。

水泥：請參閱 5-1-1-1。



圖 5-49 天然粒料



圖 5-50 電弧爐碴

(資料來源：洪延良 2009)

(資料來源：洪延良 2009)

5-4-1-2 試驗方法

鋪面層觀測系統

本系統之高度約為 55 cm，長度、寬度各約 70 cm，可放置長、寬各為 60 cm 之透水鋪面。運作時如圖 5-51 所示，當水頭之高度穩定時即對透水鋪面進行定水頭試驗，可測定各種狀況下的鋪面滲透係數 (K)。

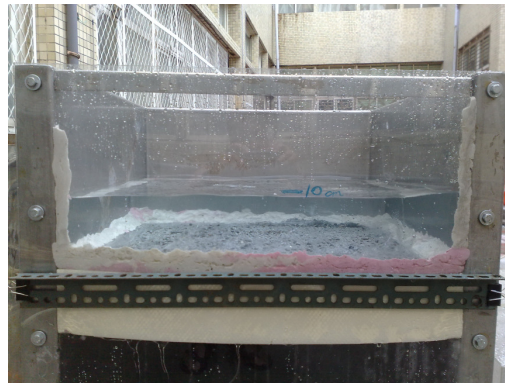


圖 5-51 透水係數試驗裝置

(資料來源：洪延良 2009)

降雨模擬系統

1. 人工降雨模擬

本計畫針對自然降雨的情況設計一人工模擬降雨器，以下將說明試驗過程中所設定之降雨條件及人工模擬降雨器構造等相關內容。

2. 設計降雨

設計降雨普遍用於訂定水文系統設計中所需的降雨型態，必須考量降雨深度、降雨強度和降雨延時的關係。目前一般水利工程的規劃設計中，大多收集數十年的雨量觀測資料後及考量各種不同延時的雨量資料後進行統計分析，據此推估不同頻率的降雨深度，再繪製降雨強度-延時-頻率曲線 (IDF curve) 當作為設計依據。

一般而言，若降雨延時越短則該次暴雨強度越大，反之降雨延時越長則其強度越小，亦即降雨強度和降雨延時成反比關係。蒐集多次暴雨之降雨強度與降雨延時的記錄後，可以縱座標表示降雨強度(mm/hr)及橫座標為降雨延時(min)繪製降雨強度-延時曲線，其曲線方程式一般以 Horner 式表示：

$$I = \frac{a}{(t + b)^c} \quad (5-6)$$

式中，I 為降雨強度(mm/hr)；t 為降雨延時(min)；a、b 及 c 為待定係數。

本計畫參考經濟部水利署 2001 水文設計應用手冊的資料，推估各頻率年之設計暴雨，如表 5-28 所示，並據此作為試驗設計標準，過程中採用 5 年一次的降雨頻率作為降雨強度，降雨延時設定為 60 分鐘。

表 5-28 台北雨量站不同降雨延時及頻率（次/年）下之設計暴雨強度^[68, 69]

重現期距	2 年	5 年	10 年	25 年	50 年	100 年	200 年
延時 30 分降雨設計強度 (mm/hr)	75	94	103	111	115	117	120
延時 60 分降雨設計強度 (mm/hr)	49	69	82	99	112	125	137
延時 90 分降雨設計強度 (mm/hr)	39	53	63	76	85	95	104
延時 120 分降雨設計強度 (mm/hr)	32	44	53	64	74	84	94

(資料來源：經濟部水利署 2001)

3.人工降雨模擬器

使用人工降雨模擬器之目的是希望在現地透水鋪面試驗過程中，所模擬之降雨條件能夠接近「自然降雨」之情況。該降雨器的架構如圖 5-52 所示，主要可分成兩部份，一為可移動式壓克力桁架，另一為降雨用噴嘴。為模擬自然降雨的情況，噴嘴應滿足設計出水量且須能均勻噴灑水量至鋪面上，故選擇上應以噴水量與噴灑角度為依據。本計畫採用 2 kg/cm^2 之噴嘴，其噴嘴角度為 70° ，降雨範圍恰可涵蓋試體，每分鐘出水量為 0.42 升。

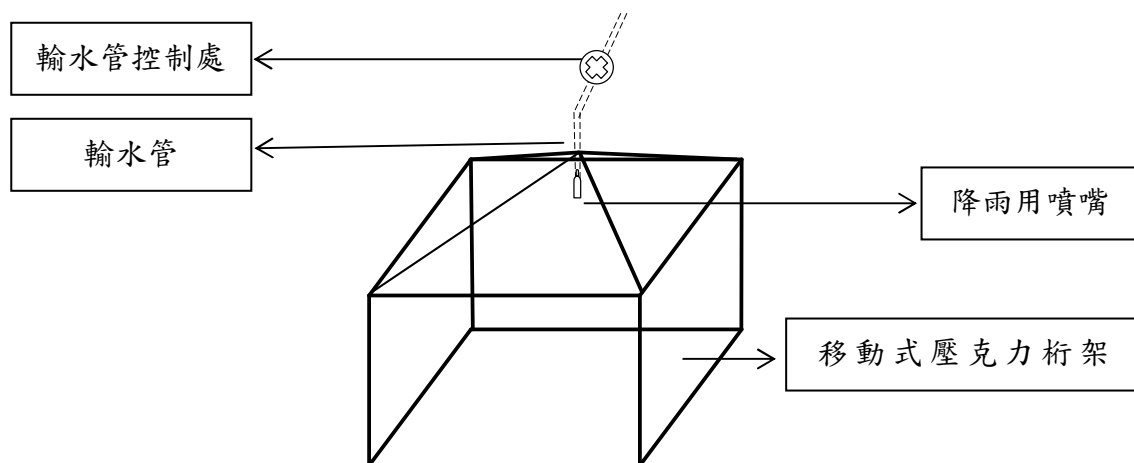


圖 5-52 人工降雨模擬器示意圖

(資料來源：洪延良 2009)

5-4-1-3 試驗配比

於配比設計中，粒料共分天然粒料及電弧爐渣粒料 2 種，主要變數為漿體填充粒料孔隙的百分率(70 %、80 %、90 %)，以水泥作為膠結料，水灰比為 0.35，如表 5-29 所示。

表 5-29 透水混凝土配比(kg/m³)

編號	水灰比	拌合水	水泥	天然粒料	電弧爐渣
O7	0.35	131	374	1720	-
O8		150	428	1720	-
O9		168	481	1720	-
B7		135	386	-	2009
B8		154	440	-	2009
B9		173	495	-	2009

(資料來源：洪延良 2009)

編號說明：O 表示普通透水混凝土；

B 表示電弧爐渣；

數字表示漿體填充粒料孔隙的百分比(70 % (7)、80 % (8)、90 % (9))

5-4-1-4 試驗結果與討論

透水混凝土抗壓強度試驗結果

圖 5-53 為透水混凝土抗壓強度試驗的結果，進一步整理後的結果如圖 5-54 所示。

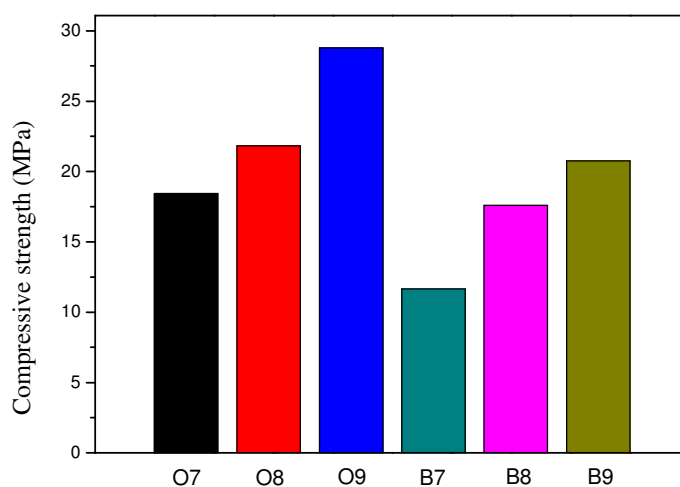


圖 5-53 養護 28 天透水混凝土抗壓強度試驗結果

(資料來源：洪延良 2009)

圖 5-54 為漿體填充孔隙率與抗壓強度之關係，可發現混凝土的抗壓強度會隨著填充比例的增加而增加，且使用電弧爐渣粒料的混凝土強度較低。

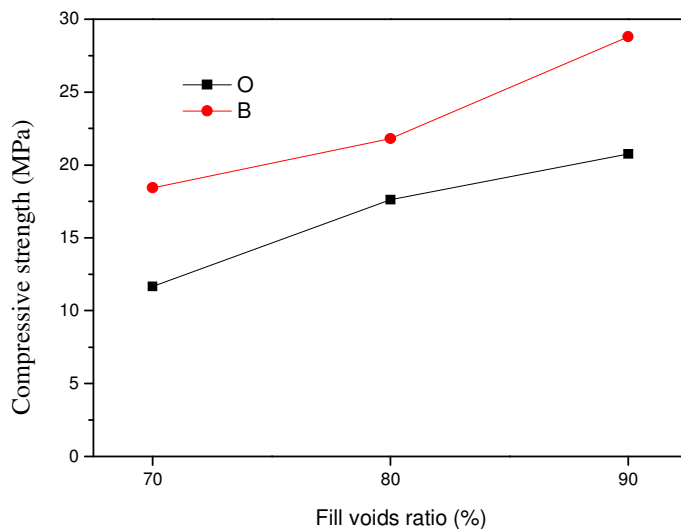


圖 5-54 漿體填充粒料孔隙率與抗壓強度關係

(資料來源：洪廷良 2009)

圖 5-55 為透水係數試驗的結果，整理後如圖 5-56 所示。

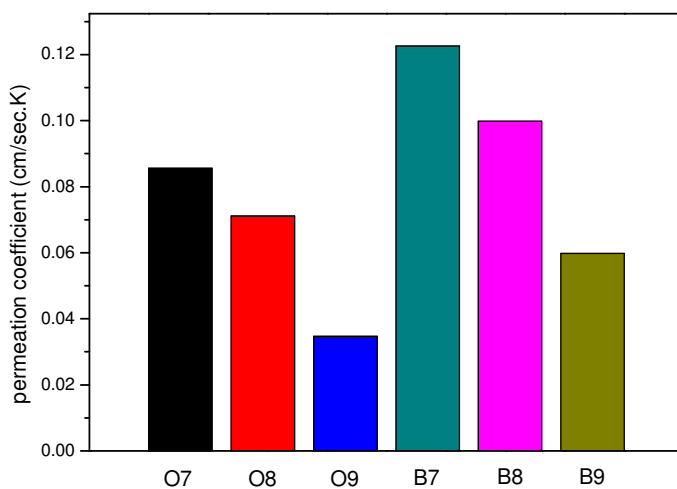


圖 5-55 透水係數試驗結果

(資料來源：洪廷良 2009)

圖 5-56 為漿體填充孔隙率與與透水係數(K)之關係，可發現混凝土的透水係數會隨著孔隙填充比例的降低而增加。

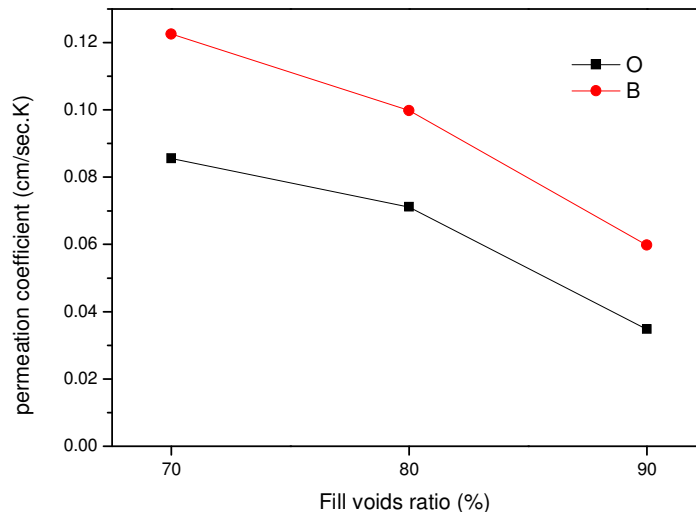


圖 5-56 漿體填充孔隙率與透水係數關係

(資料來源：洪延良 2009)

第五節 使用廢棄物、工業副產物或再生粒料的混凝土

由於全球人口逐漸增加，各國為了改善民生問題與促進經濟的成長積極推動許多土地的開發與大型的公共建設，因此造成天然粒料的需求量大幅提升。雖然目前天然粒料的價格低廉、來源廣泛且取得容易，但自然資源並非取之不盡用之不竭，若不嚴格管制，未來將面臨資源枯竭、山體滑動及河床改道等環境衝擊問題，因此廢棄物再利用對於環境資源的保護及永續發展非常具有意義。

另一方面，近年來由於天災與人為的關係，導致大量老舊或新建物出現劣化及損壞的現象，許多設施甚至已經失去原有的功能，將面臨拆除重建的問題。然而，大部分這些所謂的建築垃圾經常未經任何處理即被運往郊區或城市周邊進行簡單的填埋或露天堆積，如此不僅浪費土地資源亦污染了生態環境。反之，若能有效再利用這些建築廢棄物，不僅不會影響建設的推動，亦具環境資源保育之功用。

由於前幾節已經列舉了許多相關的材料及試驗方法，因此於本節的試驗案例中將進一步針對再生粒料的應用進行簡單的試驗比較。

5-5-1 試驗案例

5-5-1-1 試驗材料

水泥：請參閱 5-1-1-1。

天然粗粒料：請參閱 5-1-1-1。

細粒料：請參閱 5-1-1-1。

拌合用水：請參閱 5-1-1-1。

再生混凝土粒料：粒料比重為 2.44、吸水率 1.7%，最大粒徑約 3 cm，外觀如圖 5-57 所示。



圖 5-57 再生混凝土粗粒料

(資料來源：本研究整理)

電弧爐碴：請參閱 5-4-1-1。

5-5-1-2 試驗配比

本案例中混凝土的水灰比為 0.5，主要使用天然粗粒料為控制組，另外選擇電弧爐碴、再生混凝土粗粒料等 2 種粗粒料為對照組，以完全取代天然粗粒料的方式製作混凝土，如表 5-30 所示。

表 5-30 再生粒料混凝土配比(kg/m³)

編號	水灰比	水泥	細粒料	天然粗粒料	電弧爐碴	再生混凝土粗粒料
O		440	649	934		
B	0.5	440	649		951	
r		440	649			898

(資料來源：本研究整理)

編號說明：O 表示普通混凝土；

B 表示電弧爐碴；

r 表示再生混凝土粗粒料；

5-5-1-3 試驗結果與討論

再生粒料混凝土抗壓強度試驗結果

表 5-31 與圖 5-58 為再生粒料混凝土抗壓強度試驗的結果，顯示在不同配比與不同養護齡期下的抗壓強度。

表 5-31 再生粒料混凝土抗壓強度試驗結果(MPa)

養護天數	編號	OPC	B	r
7		36.85	37.89	29.86
14		40.78	40.89	30.8
28		44.3	45.9	32.88

(資料來源：本研究整理)

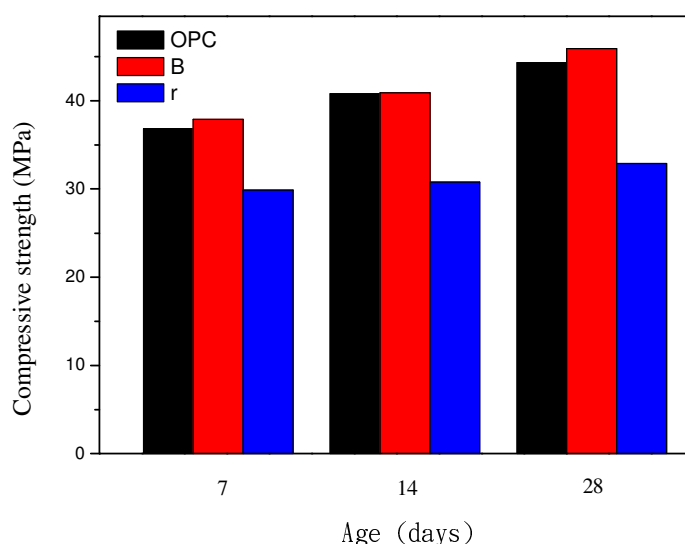


圖 5-58 再生粒料混凝土抗壓強度

(資料來源：本研究整理)

數據經進一步整理後如圖 5-59 與圖 5-60 所示，其中由圖 5-59 可以發現，再生粒料混凝土在不同養護齡期下的抗壓強度與普通混凝土近似，亦會隨著養護齡期的增加而增加。由圖中也可發現，再生粒料混凝土的抗壓強度相較於普通混凝土是較低的，而電弧爐渣混凝土與普通混凝土相較則無明顯差異。

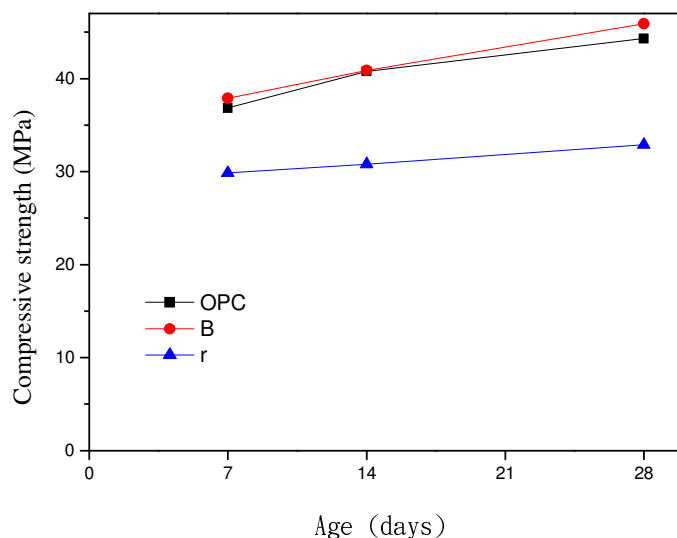


圖 5-59 再生粒料混凝土與養護齡期關係

(資料來源：本研究整理)

由圖 5-60 得知，再生粒料混凝土的抗壓強度與普通混凝土相較降低約 26%，而電弧爐渣混凝土則會增加約 4%。

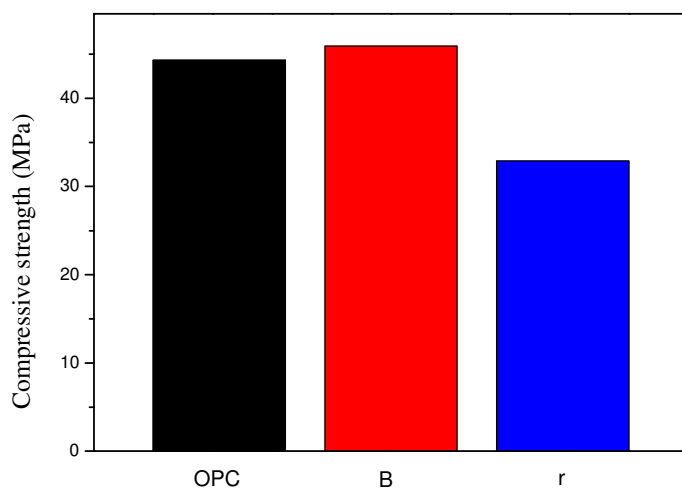


圖 5-60 養護 28 天再生粒料混凝土抗壓強度

(資料來源：本研究整理)

第六節 小結

永續混凝土依據達成目的，可涵括 ACI 的六類，除提升混凝土耐久性、大量使用再生材料外，應加強節能減碳的水泥生產技術與改善人居環境智能材料的研發。本章在試驗案例中設計相關配比與材料參數，透過試驗計劃方式敘明相關試驗法及應用範圍，並獲得必要試驗數據。

第六章 永續混凝土生命週期評估

第一節 生命週期評估軟體

6-1-1 生命週期評估軟體

2010 年學者 Moigna 利用生命週期評估方法比較傳統電漿塗層與噴塗材料的溶液對環境的影響，該評估採用 SimaPro 分析軟體資料庫中的原料與能源模式 Eco-Invent 第二版進行評估^[70]。2009 年 Dufour 利用 SimaPro7.1 分析軟體資料庫中 Eco-Indicator 95 模式，探討分解甲烷（天然氣）使其與二氧化碳和水蒸氣反應後固化後所形成 CH_4C 與 H_2 等產物對降低環境負荷及溫室氣體排放的效益^[71]。埃及學者為了改善及提高城市供水系統的品質與永續性，曾採用 SimaPro 分析軟體資料庫中的 Eco-Indicator 99 模式進行生命週期分析，結果發現對於城市供水系統影響最大的有 68 % 源自於最初階段處理冷卻後的廢水，然後有 18 % 源自於高耗能的汙水處理廠^[72]。近年來，減少碳足跡是當前國際間一項非常重要工作。2011 年，有學者希望能減少購物袋對碳足跡的影響，因此針對購物袋(塑膠、紙袋、不織布、布)由搖籃至墳墓的生命週期過程進行調查，並採用 SimaPro7.2 軟體及 IPCC 2007 的方法計算與分析 100 年內的總碳排放量，依照分析的結果提供該國政府改善與建議方案^[73]。同年，學者 Monaco 為了優化產品的生產價值，曾利用生命週期成本(Life cycle costing, LCC)的方法來分析產品的經濟性，同時考量到產品生產對環境衝擊的影響，因此採用 SimaPro7.1 軟體資料庫中的 Ecoindicator99 和 Impact2002 模式進行環境衝擊評估^[74]。

當前市面上生命週期評估的相關軟體不僅只有荷蘭開發 Simapro，還有許多來自其它國家所開發的軟體，如美國的 Weston、FAL 公司的 REPAQ、ChemSystem 公司的 LIMS、瑞士 EMPA 公司的 EcoPro、英國的 Boustead 及 PIRA Internationnal 公司的 PEMS 及臺灣的 DoITPro，各生命週期評估軟體的特性整理如表 6-1 所示。

表 6-1 生命週期評估軟體的特性

軟體名稱	發展國家	種類	特性
DoITPro	臺灣	資料庫	1.具台灣本土化環境資料。 2.電子產品的資料豐富。 3.可計算盤查結果與環境衝擊評估。
GaBi	德國	資料庫	1.軟體提供自動單位換算之功能。 2.可進行成本和工作時間之分析。 3.資料庫的分類完善。
Boustead	英國	資料庫	1.參考之數據很充分。 2.軟體供應者可協助數據更新。 3.架構簡單容易理解。 4.資料容易累積。
Weston	美國	試算表	1.運算過程透明化。 2.系統固定分成三級。 3.易建立特殊用途。
Ecopro	瑞士	資料庫	1.衝擊評估的能力佳。 2.可分別表示在不同介質中的數值。
SimaPro	荷蘭	資料庫	1.易於學習。 2.數據累積能力極佳。 3.各資料庫之間的數據可互換。

(資料來源：環保簡訊)

經濟部工業局於 ISO14000 系列-生命週期評估技術與應用手冊中曾針對 EcoPro、SimaPro、Boustead 三種軟體的學習難易、衝擊評估的能力與數據使用進行比較，如表 6-2 所示。

表 6-2 生命週期評估軟體差異^[75]

項目\軟體	SimaPro	EcoPro	Boustead
易於學習	優	好	尚可
累積數據	優	差	好
衝擊能力評估	優	優	無
運算的透明度	尚可	尚可	尚可
視覺化之輸出與輸入	尚可	好	差
參考數據之充分程度	好	尚可	優
軟體供應者協助數據更新	尚可	無	有
燃油/電力/運輸數據之掌握	尚可	尚可	優

(資料來源：行政院環保署)

文獻調查的結果顯示 SimaPro 軟體較受大眾青睞，較其它兩種軟體具較高的實用性，因此本研究選擇 SimaPro 作為評估產品之生命週期及對環境衝擊分析的軟體。

6-1-2 SimaPro 軟體簡介

SimaPro 軟體是由荷蘭 Leiden 大學環境科學中心 (CML) 所開發的，其目的主要在於簡化評估流程與圖示評量化數據，由於各環節之評估過程與結果均可以用系統流量 (包括物質與能量) 方式表示，故設計工程師不需要花太多心思去了解生命週期分析的實體過程及數據，便能以生命週期的觀念來改善產品設計，進而達到保護環境的目的。該軟體於 1990 年首度完成推出，現今的版本為 SimaPro7.3，每一版本的開發都代表著生命週期影響評估方法的更新，但同時間仍保留舊有的評估方法提供使用者參考選用。以下是 SimaPro 的主要特色：

1. 可完整應用於生命週期評估，包括建立評估清單及運用於影響評估的各階段，亦可應用於工作程序階段。
2. 對於不同工作程序的清單編輯與數據管理，既可以在該階段進行簡單分析也可以單純只做數據保存，甚至在整個生命週期評估中進行數據計算。
3. 內建豐富的环境資料庫，如 ETH-ESU96 (能源、電力產生、運輸)、BUWAL 250 (包裝材料的產品、運輸、銷售及最後處置方面)、IDEMAT 2001 (不同材料、技術和工

作程序的工業設計方面)、Franklin US LCI (美國日用品和包裝材料)、Dutch concrete (水泥及混凝土)、IVAM (超過 100 種應用於的建築部門的材料和 250 種生產技術的相關的能源和運輸方面)及 FEFCO (歐洲造紙業方面)等。

4. 提供多種評估方法,如 Eco-Indicator99、Eco-Indicator95、Ecopoints97、CML 92、CML 2(2001)、EDIP/UMIP 及 EPS2000 等。使用者可以選擇一種評估方法進行單一評估,也可以同時選擇多種評估模式進行比對評估。
5. 使用界面良好並提供嚮導式的評估模式,軟體可自動產生評估網狀結構圖,故大幅度降低了專業軟體的使用難度。
6. 數據處理的圖形化,使用者可以用直接觀察的方式來描述各工作程序對整個產品或材料對於環境的負貢獻。未來該軟體也會將技術及經濟的分析匯入整個評估系統中。

SimaPro 的整體評估架構可以分為:

1. 特徵化(Characterization):取一單位量顯示各指標對環境衝擊的貢獻度(計分)。
2. 標準化(Normalization):將特徵化的結果對應到實際貢獻度並展示實際計分結果。
3. 額外的(加權化 Weighting):將標準化的結果乘上各指標之權重係數後所得之結果。
4. 單一分數(Single Score):改以產品製程為指標,重新計算環境衝擊貢獻度。

第二節 永續混凝土生命週期評估案例分析

本節以第五章第一節的低碳混凝土配比為例評估其生命週期,希望知道案例中水、膠結料、粒料等對減碳的效益和溫室效應的影響。

本研究先透過生命週期評估法,針對低碳混凝土配比中的每項材料進行生命週期盤查,評估方式是採 SimaPro 7.3 內建的環境衝擊評估模式 Eco-Indicator95 來評估溫室效應的影響,其中利用聯合國跨政府氣候變遷小組 IPCC 所制定的計算公式計算碳排放。

5-2-1 混凝土組成材料的生命週期盤查

1. 水及粒料生產過程的生命週期盤查

根據臺北自來水事業處公佈的資料得知,自來水的生產過程大致須經過原水取水、淨水處理及加壓供水等過程。粒料的生產則包括原石的開採及破碎處理,最後再

經由過篩後使用。

2. 水泥生產過程的生命週期盤查

圖 6-1 為水泥生產的流程圖，顯示由生料的處理到研磨水泥中間的每一個過程皆需要用到燃料或者是電力，這些都是水泥生產過程中二氧化碳排放的主要來源。

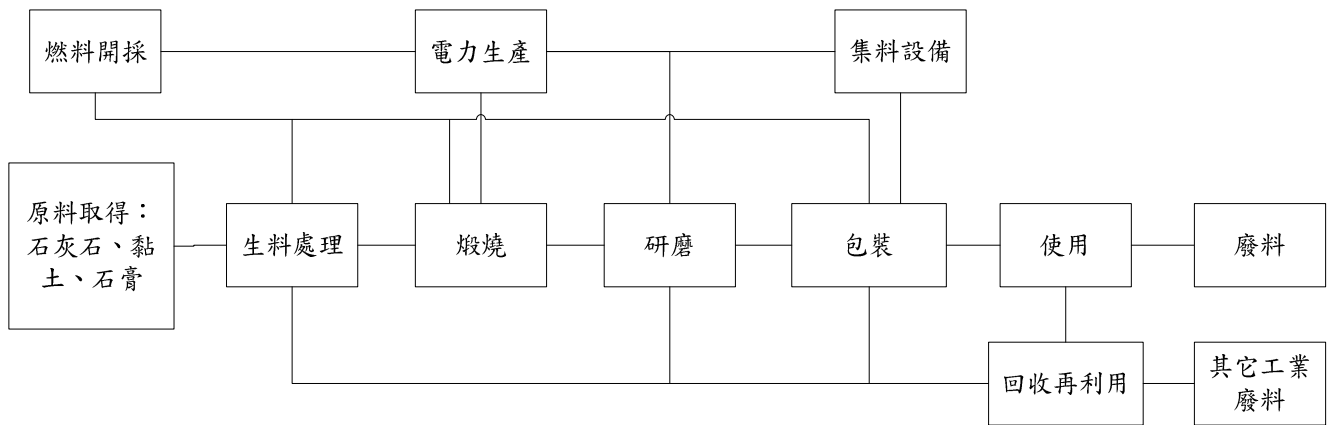


圖 6-1 水泥生產流程

(資料來源：本研究整理)

3. 飛灰與爐石生產過程的生命週期盤查

飛灰與爐石皆屬工業副產品。產品二氧化碳的排放可分為兩階段，第一階段為主要階段，是產品生產過程的二氧化碳排放。第二階段則為次要階段，是工業廢料轉為副產品加工過程中的二氧化碳排放。由圖 6-2 得知，飛灰的加工過程僅需要乾燥處理。再由圖 6-3 得知，水淬爐石粉末的加工過程中須經過水冷、乾燥、及研磨最後才得到水淬爐石粉末，而這些過程都需要使用到燃料或電力。

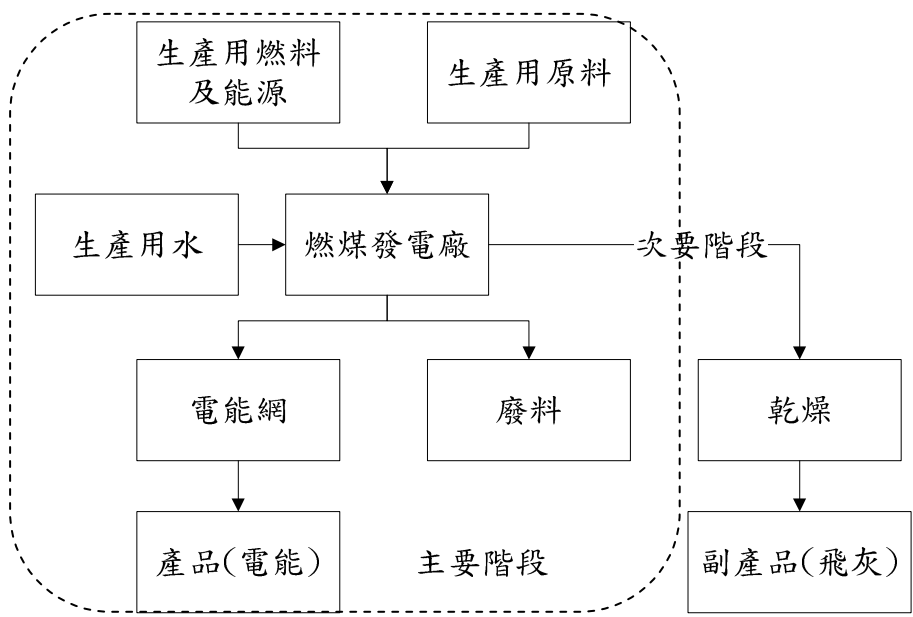


圖 6-2 飛灰產出流程

(資料來源：本研究整理)

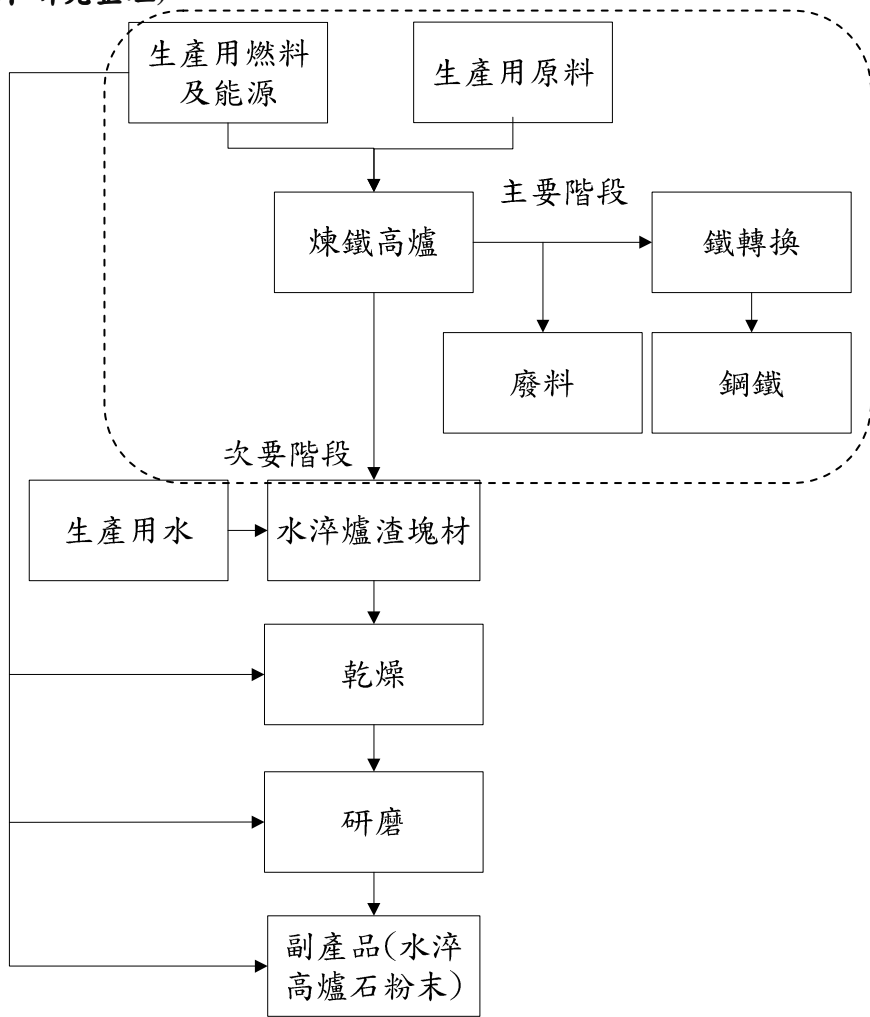


圖 6-3 水淬爐石粉產出流程

(資料來源：本研究整理)

5-2-2 混凝土組成材料生命週期的盤查結果

表 6-3 為混凝土組成材料生命週期的盤查結果。表中顯示，每生產 1 公噸的水泥必須消耗 110 kg 的燃煤和 111.3 kwh 的電力。每生產 1 公噸的水需消耗 0.16 kwh 電力。生產飛灰只需要乾燥，因此幾乎不消耗能源。每生產 1 公噸的爐石在冷卻、破碎及研磨過程中，共需要消耗 14 kg 的燃煤及 70 kwh 的電力。

表 6-4 顯示每生產 1 公噸水泥所需的原料數量。由表中得知，每生產 1 公噸水泥需要消耗 1.28 ~ 1.4 公噸的石灰石，0.05 ~ 0.1 公噸的矽砂，0.05 ~ 0.1 公噸的鐵渣，0.09 ~ 0.18 公噸的黏土及 0.03~0.04 的石膏。

表 6-3 混凝土組成材料的能源消耗

生產	燃煤(kg)	電能(kwh)
水泥(ton)	110	111.3
水(ton)	0	0.16
粒料(m ³)	0	17.064
飛灰(ton)	0	0
爐石(ton)	14	70

(資料來源：本研究整理)

表 6-4 生產 1 公噸水泥所需的原料(公噸)

原料	石灰石	矽砂	鐵渣	黏土	石膏
數量	1.28~1.4	0.05~0.1	0.05~0.1	0.09~0.18	0.03~0.04

(資料來源：本研究整理)

5-2-3 盤查結果分析與討論

混凝土組成材料碳排放量計算與討論(IPCC 計算模式)

圖 6-4 為混凝土組成材料的碳排放量計算特徵化的結果。由圖中得知，表 5-8 低碳混凝土配比條件下的組成材料中，對於碳排放影響最大的是水泥的生產，其次是水淬高爐石粉。

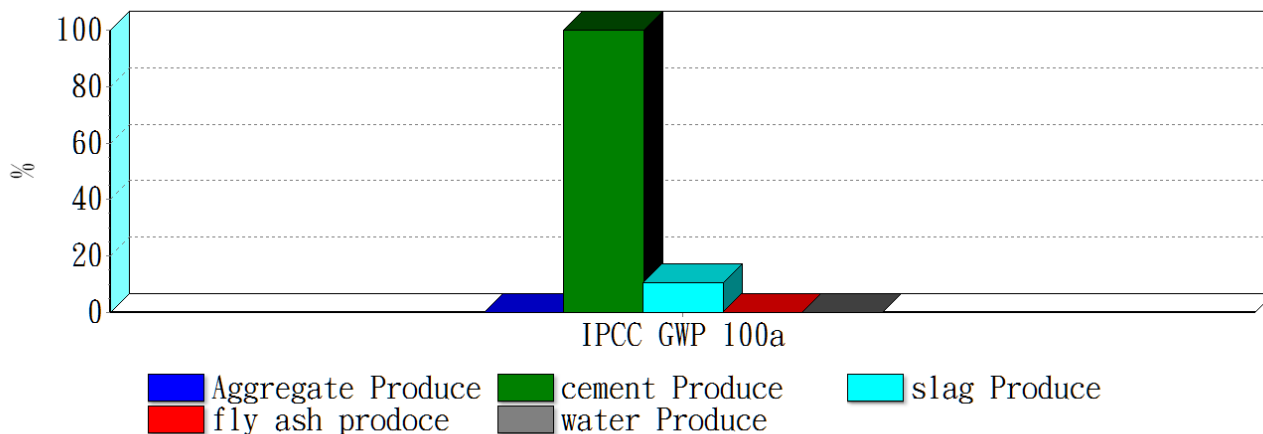


圖 6-4 混凝土組成材料碳排放量計算特徵化結果(IPCC 模式)

(資料來源：本研究整理)

根據 IPCC 模式的計算結果可得知，平均每生產 1 公噸的混凝土就會產生 715 kg 的二氧化碳排放。另外，Climate Wiser 計畫^[13]曾建議平均每生產 1 公噸的混凝土約產生 798 kg 二氧化碳排放，兩者間僅有 9 % 差距，由此可驗證本計畫調查結果與計算結果的可靠度。

表 6-5 混凝土組成材料碳排放量(公噸)

混凝土組成材料	水	水泥	爐石	飛灰	粒料
kgCO ₂ eq	0.0997	715	76.7	0	4.01

(資料來源：本研究整理)

低碳混凝土碳排放量計算與討論(IPCC 計算模式)

圖 6-5 為低碳混凝土碳排放量計算特徵化的結果。由圖中得知，當混凝土中的礦物摻料添加比例越高時，相對的碳排放量就會逐漸減少(圖中的數字編號為礦物摻料的添加量)。

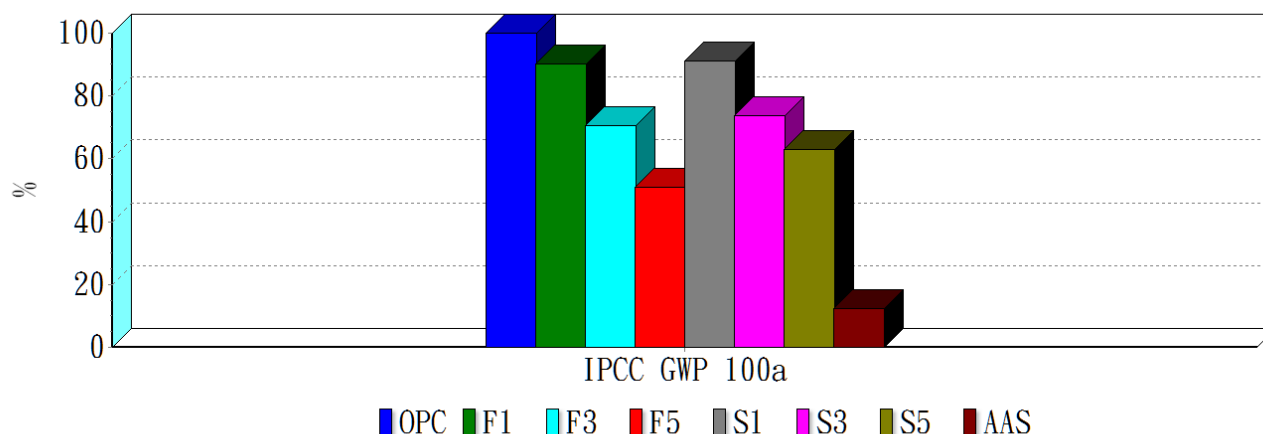


圖 6-5 低碳混凝土碳排放量計算特徵化結果(IPCC 模式)

(資料來源：本研究整理)

根據 IPCC 模式的計算結果得知，平均每生產 1 m^3 的混凝土(水膠比 0.5)就會排放 312 kg 二氧化碳。添加 10% 的粉煤飛灰時，則可減少每 1 m^3 混凝土 7%~9% kg 的二氧化碳排放量。添加 10% 的水淬高爐石粉時，則可減少每 1 m^3 混凝土 6%~8% kg 的二氧化碳排放量。

表 6-6 1 m^3 混凝土碳排放量

低碳混凝土配比	OPC	F1	F3	F5	S1	S3	S5	AAS
kgCO ² eq	312	289	226	163	293	237	202	40

(資料來源：本研究整理)

低碳混凝土對溫室效應之影響(環境衝擊評估模式 Eco-Indicator95)

圖 6-6 為低碳混凝土各配比下對環境衝擊特徵化的結果，在 Eco-Indicator95 的模式中除了可對溫室效應及對環境的衝擊進行評估外，還可以針對另外 10 種環境衝擊進行影響評估。

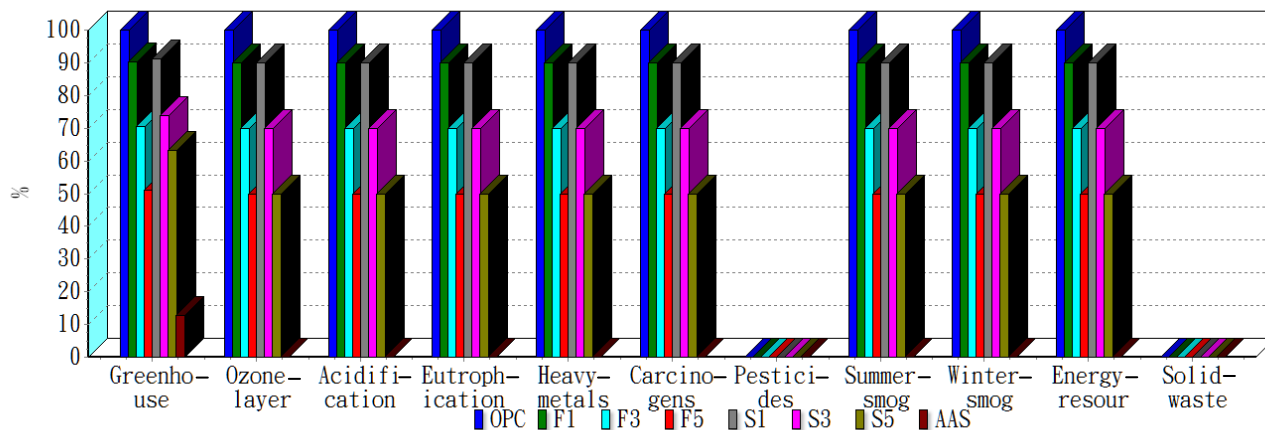
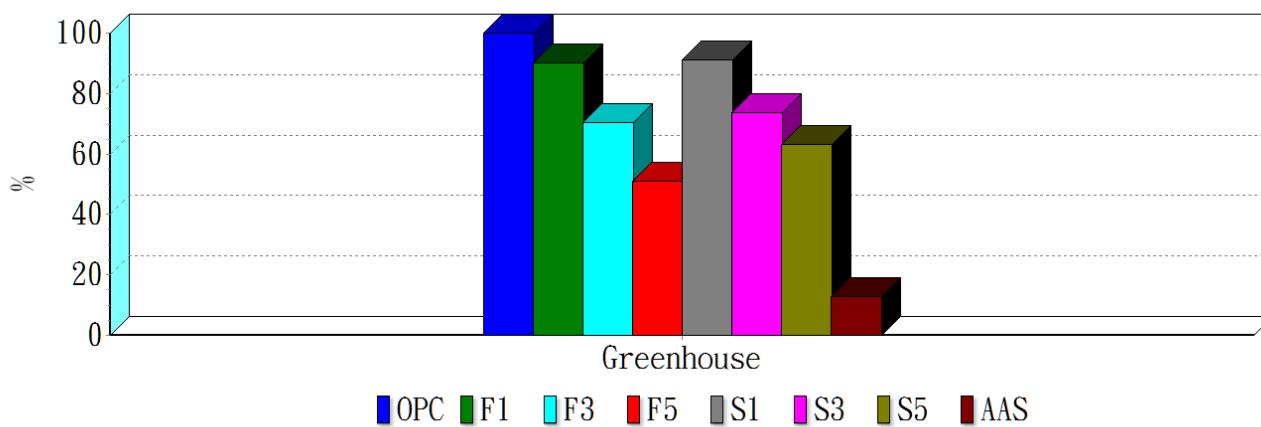


圖 6-6 低碳混凝土對環境衝擊特徵化結果(Eco-Indicator95 模式)

(資料來源：本研究整理)

圖 6-7 為低碳混凝土各配比對溫室效應之影響特徵化的結果。由圖中可發現，添加礦物摻料的混凝土相較於普通混凝土對溫室效應之衝擊較小，且會隨著添加量的增加而減小。



正在比較 製程；方法：Eco-indicator 95 V2.06 / Europe e/特性描述

圖 6-7 低碳混凝土對溫室效應之影響特徵化結果(Eco-Indicator95 模式)

(資料來源：本研究整理)

透過標準化的分析可發現，混凝土每添加 10 % 的飛灰可以降低 10 % 普通混凝土對於環境溫室效應帶來的衝擊。另外，每添加 10 % 的爐石，可降低 9 % 普通混凝土對於環境溫室效應帶來的衝擊，若使用鹼激發爐石混凝土，則大幅降低約 89 %，如圖 6-8 及圖 6-9 所示。

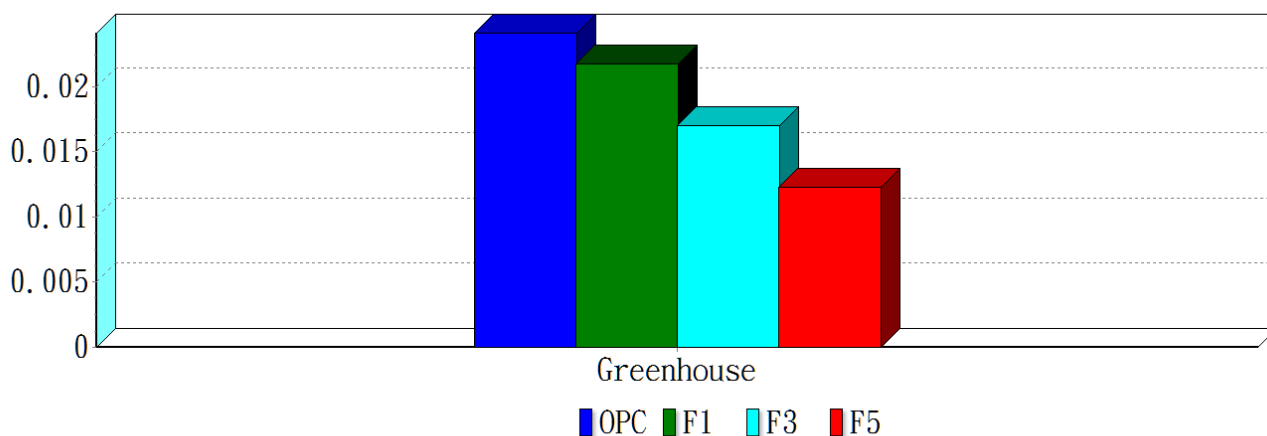


圖 6-8 粉煤飛灰添加量對溫室效應之影響標準化結果(Eco-Indicator95 模式)

(資料來源：本研究整理)

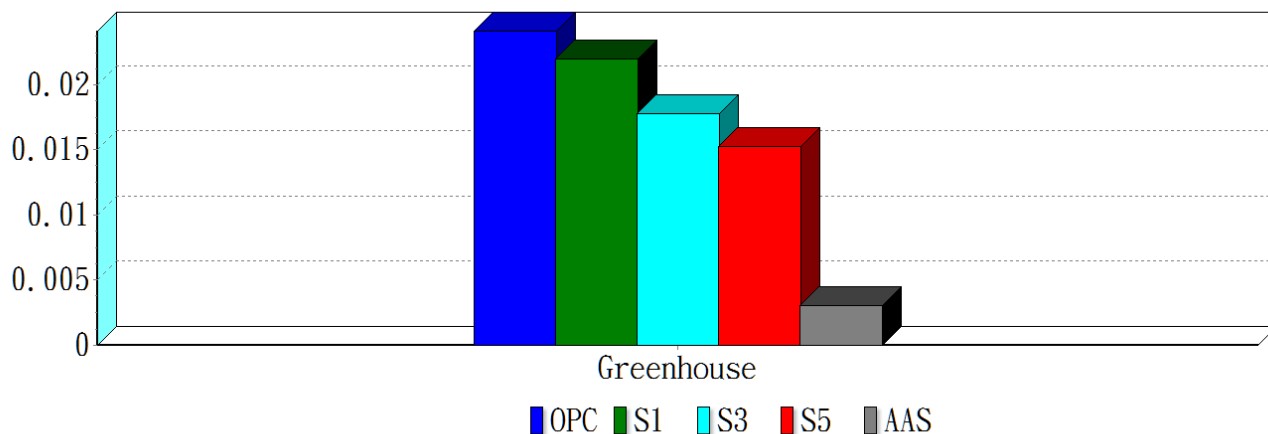


圖 6-9 水淬高爐石粉添加量對溫室效應之影響標準化結果(Eco-Indicator95 模式)

(資料來源：本研究整理)

第三節 綜合討論與小結

Simapro 可評估的範圍非常廣泛，在案例中是利用 LCA 方法來評估不同類型混凝土的碳排放量，分析結果可得知普通混凝土中的碳排放約 90% 來自於水泥，添加 10% 的粉煤飛灰(水泥重量比)時則約可減少 7%~9% 的碳排放量，添加 10% 的水淬高爐石粉(水泥重量比)時則可降低 6%~8% 的碳排放量。

另一方面，根據永續(綠色)採購指南 EPP 的五項指導原則中的第一項「產品選擇必須以其性能、價格與環保特性為基礎」^[61]來分析第五章試驗案例一中的混凝土抗壓

強試驗結果與產品價格調查結果及第六章生命週期評估案例的混凝土碳排放量的計算結果，可進一步建立普通混凝土與粉煤飛灰、水淬高爐石粉取代水泥用量 10 %、30 %、50 % (水泥重量比) 和 100 % 時的鹼激發水淬爐石混凝土之間的關係曲線。圖中實線部分係依行政院公共工程委員會所頒布的「施工綱要規範內容」規定所繪製的，結構用混凝土圓柱試體於 28 天齡期之抗壓強度 (f_c') 試驗中，任一個試體強度均不得低於 $0.85f_c$ 的合格標準^[75]。由於水泥是普通混凝土碳排放量的主要來源，而粉煤灰與水淬高爐石粉是目前混凝土使用量最多之礦物摻料，故兩者很適合做為永續混凝土碳排放量的檢測指標。透過圖 6-10 可以發現，粉煤飛灰與水淬高爐石粉添加量分別在 20 %、30 % 以上時，其 28 天抗壓強度的表現均符合規範要求。若以粉煤飛灰添加量的抗壓強度為分界點，可繪製虛線來作為碳排放量最低標準，因此建議低碳混凝土中的永續混凝土碳排放量須比普通混凝土低 20 % 以上，詳如圖 6-10 所示。

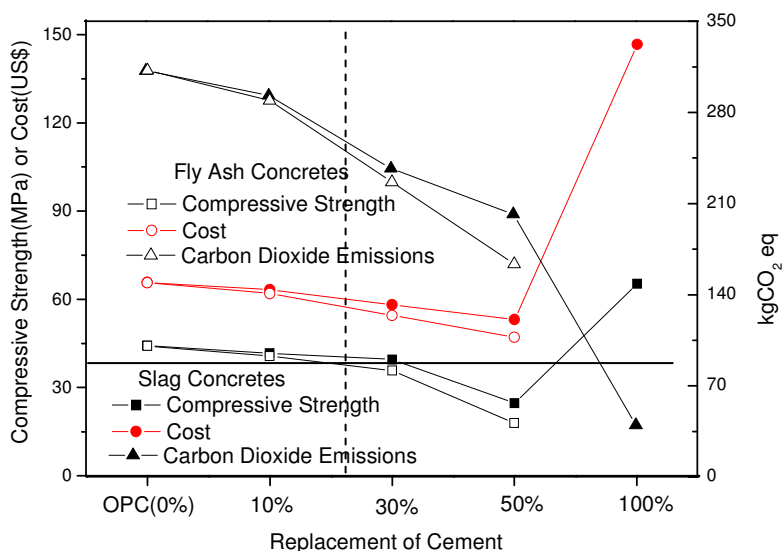


圖 6-10 抗壓強度、生產成本及碳排放量關係圖

(資料來源：本研究整理)

第七章 結論與建議

第一節 結論

1. 完成蒐集分析國內外與永續混凝土文獻及選用 SimaPro 作為評估工具。
2. 利用層級分析法與問卷調查結果，顯示永續混凝土開發評估指標，應優先考慮環境因素的影響，其次考慮材料因素。環境因素的項目中，優先考慮到對人體健康的影響，其次是碳排放量，最後為能源消耗與生態環境問題。台灣永續混凝土組成材料的參數
3. 選擇使用適當的永續混凝土(綠混凝土)應可符合永續建築(綠建築)的要件。
4. 永續混凝土依據達成目的，可涵括 ACI 的六類，除提升混凝土耐久性、大量使用再生材料外，應加強節能減碳的水泥生產技術與改善人居環境智能材料的研發。
5. 經由試驗結果與調查結果得知，適量的添加具特殊性能的工業廢棄材料，可以降低混凝土生產成本，但如果過量反而可能降低原本要求的功能，甚至增加生產成本。
6. 利用 Simapro 軟體針對 8 種混凝土進行生命週期評估，計算全部材料生產過程的碳排放量，並由分析案例得知純水泥混凝土碳排放約 90%是來自於水泥，混凝土每添加 10 %的粉煤飛灰(水泥重量比)約可減少每 7 % ~ 9 % kg 的碳排放量，添加 10 %的水淬高爐石粉(水泥重量比)可降低 6 % ~ 8% kg 的碳排放量。

第二節 建議

立即可行之建議

主辦機關：內政部營建署

協辦機關：內政部建研所或相關部會

本計畫在參照 ACI 永續混凝土的分類，分別說明其意義及應用範圍，並經由試驗案例，設計相關的配比與材料參數，以試驗計劃敘明試驗法及應用，並獲得必要試驗數據。同時採用生命週期評估法，評估不同材料組成對環境的衝擊，研究結果可作為未來永續混凝土技術手冊研擬的參考。

立即可行之建議

主辦機關：內政部營建署

協辦機關：內政部建研所或相關部會

混凝土使用之水泥的碳排放量是否宜有管制法規，建議可參考國外先進國家相關作法進行相關法規的研擬。

長期性之建議

主辦機關：內政部營建署

協辦機關：內政部建研所或相關部會

永續混凝土材料參數、評估模式及相關資料庫的建議，可以經由持續研究計劃的執行而能更臻完備與普遍應用性，並比較融和國外作法研擬各種，永續混凝土之使用手冊及永續混凝土之品質標準及施工規範。

附錄一 期初審查會議意見與回應

受評廠商 1：國立台灣海洋大學

委員	審查委員意見	廠商回應
羅委員時麒	<ol style="list-style-type: none"> 1. 混凝土的生產具高耗能，請補充說明生命週期各階段對環境衝擊之差異性，例如，使用階段如具良好耐久性，可提升材料之永續性。 2. 請補充說明永續混凝土材料對建築物使用之最適當用途。 3. 請補充廢棄階段(再生混凝土)之環境影響。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 混凝土為複合材料，其生命週期各階段對環境的衝擊必須視組成而定，不能以一概之。然而，組成配比又視使用目的而定，必須達到要求性能。因此，本研究將選擇五種不同性能要求之永續混凝土並探討於不同使用階段的環境衝擊性。 2. 如上所述，永續混凝土的最適當用途須視使用目的及性能要求而定，因此本研究必須先針對五種性能不同的永續混凝土探討其永續性，再探討其與永續結構物的關聯性。 3. 本研究將考量再生混凝土再利用或廢棄拋置後，將利用 LCA 評估再生混凝土再利用或廢棄拋置對環境之影響。
陳委員正平	<ol style="list-style-type: none"> 1. 建議增列混凝土性能提升後，設計規範有哪些可改善利用價值(效率)，配合修訂之研究空間(項目或方向)。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝委員建議。本計畫會於期末報告中，提出研究成果可作為混凝土設計規範或施工規範編修之建議，其能改善混凝土利用價值或未來可再進一步研究之方向。
沈委員得縣	<ol style="list-style-type: none"> 1. 請說明永續混凝土材料對環境、社會及經濟三大議題之相關性。計畫書對社會及經濟議題說明較少，請補充。 2. 永續混凝土材料請由材料選擇、配比、製程及品管作概略性說明。 3. 請說明永續混凝土材料如何檢測及評估，並需具備哪些檢測儀器及擬定評估指標。 4. 請說明永續結構物如何檢測及 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 永續發展的內涵包括環境、社會及經濟等三方面。永續混凝土的使用直接影響環境方面的永續發展，如降低二氧化碳排放量、使用回收材等，本研究將多著墨於此。相對地，永續混凝土亦對社會與經濟兩方面的永續發展有所助益。如同簡報所言，永續混凝土如可提升其工作性，則可減少搗實、易於泵送，故可減少人力的投入，對於整體社會而言，當可減少職災的可能及有

	<p>評估，並應具備哪些檢測儀器及擬定評估指標。</p> <p>5. 計畫書在人力規畫上欠詳細，請作補充。</p>	<p>助於營造工人的身心健康。此外，永續混凝土如能提高耐久性，就生命週期而言，更可減少耗費成本。有關社會與經濟這兩方面，本研究會於期末報告補充討論，然而基於計畫期程的關係，因此本研究僅針對環境衝擊影響進行探討。</p> <p>2. 不同功用之永續混凝土開發，其材料選擇、配比、製程及品管，皆須搭配該功用，本研究擬選擇數項混凝土進行研究，配比、製程等會於研究報告敘述。</p> <p>3. 永續混凝土目前是一種概念或是一個廣義說法，目前國內外並無一定的標準或檢測方法，宜先依據 ISO 14040 的精神進行研究訂定指標，再根據各指標進行試驗，選定指標及訂定指標即為本研究重要目的之一。</p> <p>4. 計畫主持人負責本計畫之規劃、統合執行；協同主持人負責試驗計畫規劃、LCA 及 LCC 工作執行；研究員協助 LCA 及 LCC 工作，研究助理則負責資料蒐集及各項試驗執行。</p>
<p>張委員大鵬</p>	<p>1. 預計作為生命週期評估法 (LCA) 軟體的名稱與應用性，請說明。</p> <p>2. 與 LCC 間之參數如何評量？</p>	<p>1. 本計畫生命週期評估擬採用 SimaPro 軟體，ISO 14000 系列—生命週期評估技術與應用手冊中，曾針對 SimaPro、EcoPro、Boustead 等三軟體，依據學習難易、模式評估與數據使用等功能進行比較，指出 SimaPro 軟體整體而言功能與使用性較佳。</p> <p>2. LCA 與 LCC 評估參數，本計畫擬先蒐集歐美等各國的相關資料，再參酌國內現況，擬定評估參數並於專家座談會中提出討論。</p>

<p>林副召集人建宏</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 座談會 2 次之召開時機為何？ 2. LCA 及 LCC 評估，本土化參數取得不易，甚至沒有，如何因應？ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 當完成擬訂永續混凝土定義及範疇，並建立生命週期評估法後，召開第一次專家座談會，建立永續結構物與永續混凝土的關連性及試驗項目。完成試驗計畫，草擬評估指標與應用範圍指針後，召開第二次專家座談會，確認研究成果。 2. 本計畫擬先蒐集國內外 LCA 及 LCC 相關評估參數，依照台灣現況選擇適當參數，經由試驗數據確認本土化重要評估參數及其評估意義。
<p>李召集人玉生</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 有關計畫書人力配置，協同主持人經歷起訖年月須做修正，且如何與研究團隊搭配？請說明。 2. 請說明預計實驗之項目。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 協同主持人資料及經歷已更新。協同主持人為台科大教師其專長為耐久性及微觀分析，亦可提供相關資源、儀器設備支援本計畫進行。 2. 本計畫擬針對高強度耐久性、透水、自充填、隔熱、使用再生材料等五類用途之混凝土進行試驗。試驗項目包括，加速氯離子滲透試驗、碳化試驗、透水試驗、壓汞式孔隙量測試驗、吸水率試驗、透水係數試驗、抗壓強度試驗、SEM 微觀觀察、EDS 元素分析、XRD 成分分析、流度試驗、熱導係數試驗、泌水率試驗、坍度試驗等。

附錄二 期中審查會議意見與回應

委員發言重點與回應（依發言順序）：

委員	審查委員意見	研究團隊回應
中華民國全國建築師公會	<ol style="list-style-type: none"> 請於本研究案中加入成本分析或單價分析表說明之。 有影響到建築技術規則或施工規範的部份，請列表說明之。 	<ol style="list-style-type: none"> 感謝委員建議，若時間允許，本計畫會補充有關成本或單價的相關資料。 感謝委員意見，關於是否影響建築技術規則或施工規範問題將於期末報告中補充說明。
中華民國結構技師公會全聯會	<ol style="list-style-type: none"> 報告中之相關文字名稱請統一。 第 30 頁之孔隙率公式(4-2)請在確認其正確性。 第 29 頁表 4-4 有 2 處出現，請確認。 	<ol style="list-style-type: none"> 感謝委員意見，關於委員所提的 3 個問題，本團隊會期末報告中加以修正。
台灣省建築材料商業同業公會聯合會	<ol style="list-style-type: none"> 永續混凝土對經濟、環境、循環再生的開發與應用，及節能減碳具有相關聯性，建議請列入評估。並請將組成材料、配比參數、耐久性...等試驗參數，一併納入應用研究項目。 傳統混凝土與永續混凝土(綠色混凝土)的差異，請列表分析與比較。 	<ol style="list-style-type: none"> 感謝委員建議，關於以上 2 建議，本計畫將列入參考。
石正義 建築師	<ol style="list-style-type: none"> 建議對於 p.37 4-1-2 的配比設計，提出為何決定採用此等配比的原因。 建議注意所開發的混凝土材料之試驗以外的特性。(例如：做為結構體時，結構體本身的防水性不宜小於傳統材質) 	<ol style="list-style-type: none"> 計畫中配比設計主要是要各類的永續混凝土之間的差異當作後續案例說明的參考的基準 感謝委員意見，關於委員所提的第 2, 3 個問題，本團隊在撰寫期末報告時列入參考，並加以修正。

	<p>6. 第 38 頁編號說明如 N1G2 中，N1 的阿拉伯數字是否亦表示配比。若是的話應在 p.38 最後一行列入說明，若否的話，應將“1”去除。</p>	
<p>邱昌平顧問</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 本研究依 ACI 對永續混凝土定義的 5 大類，做 5 大類組之配比設計進行試驗計劃(以抗壓、RCPT、吸水率、孔隙率、MIP...等)，未來將提供 LCA 評估軟體做 LCA 分析之用，過程尚屬良好。 2. 試驗結果因試體數目有限，若能有其他國內外之數據加入應用可能更理想一些。 3. 大都專家學者對 LCA 涉獵不多，以問卷法去決定權重，是否合宜？ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝委員意見。 2. 對於第 3 個問題，若單純採用問卷決定該權重，當然不確定性較高，而本計畫在研究中除了問卷調查以外，也加入試驗與 LCA 方法，如此應該有助於降低答案的不確定性。
<p>沈得縣教授</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 本計畫資料收集詳細值得肯定，但針對永續混凝土之定義仍欠完整。 2. 摘要中指出永續發展包括環境、社會及經濟 3 個議題，但全文仍侷限於環境議題。在社會及經濟 2 個議題則著墨較少，建議社會及經濟可賦予適當權重。 3. 本計畫中研究主題為永續混凝土材料之實驗開發與應用，但範圍太廣不知道要如何應用及推廣，建議能縮小範圍深入探討。 4. 本計畫應優先釐清永續混凝土之定義及評估指標，並確認永續混凝土與永續結構之關聯性。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝委員意見。 2. 永續發展的確包括環境、社會及經濟 3 個議題，但由於本計畫執行時間不到 11 個月，礙於時間關係，故僅針對環境部分討論。 3. 感謝委員建議，第 3, 4 個建議，本團隊會遵照辦理。

<p>高健章教授</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 本案配合之多項試驗目的為何？所求之參數是否可從已往他人之成果可得？在有限人力、物力下，應集中精力探求較關鍵性之參數及其試驗，如有規畫請說明之。 2. 混凝土中性化是一種從大氣中吸回二氧化碳之作為，此因素是否列入考量。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 本試驗計畫是想經由多方面角度來探討永續混凝土，試驗中有部分數據是需通過試驗和參考他人試驗結果獲得，再依材料組成參數套用 SimaPro 分析比較彼此間的差異。 2. 混凝土中性化的行為，當然可以列入永續混凝土評估範圍，但本計畫目前主要整理永續混凝土評估架構，因此暫不列入考量。
<p>張大鵬教授</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 參考文獻(p.55-60)之排列方式依出現之順序排列，參考書目第 13、14、58、59 似乎未在本文中被引用。 2. 本文各圖形、表格之參考文獻應列出文獻編號(表 2-1、圖 2-4、圖 2-5、圖 3-1、表 5-1...等)。 3. 圖 4-2、圖 4-3...等常用“本研究整理”須確定係原創者，否則須列出文獻出處。 4. 本研究列有 5 項混凝土配比，其試驗份量很重。各試體數量、齡期試驗等多數規畫，宜極早進行。(建議予以刪減或引用他人資料加以分析)。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝委員意見，文字與格式編排部分，於期末報告中會謹慎處理，試驗配比部分本團隊，會視情況加以考量。

<p>黃兆龍教授</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 國內外相關綠色混凝土之研究報告及論文應全盤收集，並加以合理分析。 2. 談到永續宜跟壽命、品質、耐久性之指標成正相關，應有清楚之量化指標，可參考張大鵬教授與建研所合作之「綠色混凝土」研究案。 3. 永續混凝土設計是否應 Design-in 的方式，自設計開始即將永續之準則考慮進去。 4. 永續混凝土之研發及資源再利用符合永續政策，故宜將國內現有資料加以分析，以大量降低水泥之用量，提升水泥強度效益為原則。 5. 為了有效增進政府施政效能，應有明顯量化資訊。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝委員建議，以上 4 個建議，本計畫將於執行中列入參考。
<p>王亭復技師</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 永續混凝土材料在國家標準修訂上已加入工業副產品作為粒料的標準，如水淬高爐渣、矽灰、飛灰等之水硬性混合水泥以取代水泥量，甚具彈性。至於稻殼灰可取代部分水泥則有待本研究加強實驗研發。 2. 本研究案之配比設計似不明確，例如表 4-5 及表 4-7 中「粒料」是否包括粗、細粒料，而表 4-6 是否亦不需含粗、細粒料可達到強度及各特殊功能(低熱導、耐久性、透水性)有待本研究開發。 3. 建議每一種特殊功能混凝土之開發研究實驗宜更嚴謹，並評估預期成 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝委員意見。 2. 對於第 2 的問題，由於混凝土種類及配比種類繁多，因本計畫僅列舉幾個象徵性的配比，以提供他日相關研究的參考依據。

	<p>果。</p> <p>4. 本研究案開發產品評估主要包括生命週期評估，於試驗之前應已評估完成，第五章第二節之案例分析似宜再更詳細。</p>	
--	---	--

附錄三 期末審查會議意見與回應

委員發言重點與回應（依發言順序）：

委員	審查委員意見	研究團隊回應
沈得縣教授	<ol style="list-style-type: none"> 3. 期末報告內容豐富值得肯定，但結論與建議中對如何開發永續混凝土則著墨太少，應做補充。 4. 摘要中提及永續發展包括環境、社會及經濟三大議題，但報告中則對社會及經濟兩項著墨太少。又摘要第四項格式建議修正。 5. 期末報告將永續混凝土分成六類，建議依永續混凝土之評估項目列表比較，以利材料應用之參考。 6. 建議研擬各種永續混凝土之使用手冊。 7. 建議研擬各種永續混凝土之品質標準及施工規範。 	<ol style="list-style-type: none"> 3. 永續混凝土材料開發部分，將會於報告中加以補充。 4. 此計畫著重於混凝土碳排放對環境的影響，因此在社會及經濟問題上會列入建議未來研究之項目。另外摘要格式部分本計畫是依照合約規定排版。 5. 本計畫將於結案報告中，列表說明。 6. 關於4、5之建議，將會列入建議未來研究之項目。
王亭復技師	<ol style="list-style-type: none"> 4. 本研究已收集目前國內外有關永續混凝土相關文獻並以研究為範例，試驗分析、盤查計算混凝土生命週期。雖以技術國內可用綠色混凝土材料，然尚須待混凝土專家學者依循所述評估原則，開發永續混凝土的材料。 5. 表 5-43 及 5-44 中 R3/R6 稻穀灰及 F3/F6 飛灰材料與圖 5-45 及 5-47 似不相吻合，請予確認。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 粉煤飛灰及水淬高爐石等混凝土目前使用最多的工業廢棄材料，因此未來永續混凝土開發準則，且須依此評估準則進行研究。 2. 計畫內容將建議之項目加以修正。

<p>邱昌平顧問</p>	<p>4. 本研究重點在探討永續混凝土材料之材料因素及環境因素，為便於評估工具 SimaPro 之使用，以文中第四章之問卷調查與專家座談獲得相關因素之權重；另採用試驗計劃，五批混凝土試體進行、低碳、熱傳改良、耐久、透水、再生材料特性之相關研究獲取相同數據，成果尚好。</p> <p>5. 利用 SimaPro 對 8 種低碳混凝土 (OPC、F1、...AAs)進行 LCA 評估，得知各種混凝土之碳排放量確有顯著差異。</p>	<p>1. 純水泥混凝土碳排放約 90%來自於水泥，混凝土每添加 10%的粉煤飛灰(水泥重量比)約可減少每 7%~9% kg 的碳排放量，添加 10%的水淬高爐石粉(水泥重量比)可降低 6%~8% kg 的碳排放量，此結果將有利於永續混凝土開發。</p>
<p>蘇南教授</p>	<p>7. 本報告架構完整、內容豐富。惟下列建議，敬請參考。</p> <p>8. 建議用 SWOT 分析混凝土材料之永續性與使用的必要性。</p> <p>9. 建議對混凝土使用之水泥的碳排放量是否宜有管制法規，建議可參考國外先進國家作法。</p> <p>10. 請對水泥之環保性，是否宜有管理或標章辨識，予以國內外比較。</p>	<p>1. 關於 SWOT 分析，計畫內容第一章重要性中已有概述。</p> <p>2. 關於 3、4 之建議，將會列入建議未來研究之項目。</p>
<p>台灣省建築材料商業同業公會聯合會</p>	<p>4. 本研究永續混凝土(綠色混凝土)，從環境、生命週期評估及評估材料對降低衝擊環境的效益，符合本研究預期的成果與目標。</p> <p>5. 本研究期中會議之意見建議，期末報告均有詳細列舉(表)說明。</p>	<p>1. 感謝委員意見。</p>
<p>建築師全國公會</p>	<p>5. 請加入成本結構分析，單價分析表。簡單講 →1m³ 的永續混凝土要多少錢？(不同的強度、不同的用途、不同的配比材料)。</p>	<p>1. 假設 1 包水泥單價為 X，若以飛灰取代水泥 1/2，將會減少水泥 1/2+飛灰 1/2 的碳排放，在成本方面則會變成(X/2)+飛灰 1/2 成本。</p>

參考書目

1. Kyoto Protocol (to the United Nations Framework Convention on Climate Change) (an agreement on global warming reached by the United Nations Conference on Climate Change), 1997.
2. 經濟部能源局，“2010 製造業能源查核年報”，2011 年更新。
3. 經濟部能源局，“中華民國 98 年 能源統計年報”，2010 更新。
4. 王天民，生態環境材料，新文京開發出版股份有限公司，2004
5. オリックス株式会社，Environmental Report, 2009-2010.
6. 中華民國低碳環境協會。http://www.calce.org.tw:8081/
7. 經濟部能源局，“能源產業溫室氣體減量資訊網”，2009 更新。
http://verity.erl.itri.org.tw/EIGIC/Index.aspx
8. Andrea J. Schokker, “The Sustainable Concrete Guide – Strategies and Examples” , U.S. Green Concrete Council, 2010 .
9. World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), The Green Race is On, WBCSD Advocacy & Communications, 2009.
10. Chen, C., G. Habert, “LCA allocation procedure used as an incitative method for waste recycling: An application to mineral additions in concrete” , Resources, Conservation and Recycling Vol. 54, No.12, pp. 1231-1240, 2010.
11. Pade, C. and M. Guimaraes, “The CO₂ uptake of concrete in a 100 year perspective” , Cement and Concrete Research Vol. 37, No. 9, pp.1348-1356, 2007.
12. Vesa Penttala, “Concrete and Sustainable Development” , ACI Materials Journal, No. 94-M48, pp. 419 – 416, 1997.
13. ICF, “Climate Wiser – Cement Industry Reporting Plan and Wordbook ” , ICF consulting for U.S. Environmental Protection Agency, (EPA), Version 1.2, 1999.
14. 侯萬善、黃雪娟，“工業溫室氣體盤查簡量宣導手冊”，經濟部工業局，2004。

15. Nicolas Perez Fernandez, “The influence of construction materials on life-cycle energy use and carbon dioxide emissions of medium size commercial buildings”, Victoria University, degree of Master of Building Science, 2008.
16. Malhotra VM, “Role of supplementary cementing materials in reducing greenhouse gas emissions”, Concrete technology for a sustainable development in the 21st century, pp. 226–35, 2000.
17. McLellan, B. C., R. P. Williams, “Costs and carbon emissions for geopolymers in comparison to ordinary portland cement” , Journal of Cleaner Production Vol. 19, No. 9-10, pp. 1080-1090, 2011.
18. Australia, “Global Greenhouse Warming” , 2010.
<http://www.global-greenhouse-warming.com> (accessed July 14, 2010).
19. 江玄政, “生命週期評估手冊 (ISO 14000 系列)”, 財團法人台灣產業服務基金會/財團法人中技社, 2001。
20. Oyeshola F. Kofoworola, Shabbir H. Gheewala, “Environmental life cycle assessment of a commercial office building in Thailand”, The International Journal of Life Cycle Assessment, No.13, pp. 498-511, 2008.
21. Bastien Girod, Peter de Haan, Roland W. Scholz, “Consumption-as-usual instead of ceteris paribus assumption for demand - Integration of potential rebound effects into LCA”, The International Journal of Life Cycle Assessment, Vol. 16, No. 1, 2011.
22. Pehnt, M., “Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies”, Renewable Energy, No. 31, pp. 55-71, 2006.
23. Meyer, C. “The greening of the concrete industry” , Cement and Concrete Composites, Vol. 31, No. 8, pp. 601-605, 2009.
24. ISO/CNS 14040: Environmental management – lifecycle assessment – Principles and framework, 1997.
25. ISO/CNS 14041: Environmental management – lifecycle assessment – Goal and scope definition and inventory analysis, 1998.

26. ISO/CNS 14042: Environmental management – lifecycle assessment – life cycle impact assessment, 2000.
27. ISO/CNS 14043: Environmental management – lifecycle assessment – life cycle interpretation, 2000.
28. Senthamarai, R. M., P. D. Manoharan, "Concrete made from ceramic industry waste: Durability properties", *Construction and Building Materials*, Vol. 25, No. 5, pp. 2413-2419, 2011.
29. Jepsen Marianne Tange, Mathiesen Dorthe, "Petersen Christian Munch, Bager Dirch. Durability of resource saving 『Green』 type concrete" In: *Proceeding of FIB-symposium on concrete and environment*, 2001.
30. Nik. D. Oikonomou, "Recycled concrete aggregates", *Cement & Concrete Composites*, Vol. 27, pp. 315–318, 2005.
31. Marguerite Anne Renouf , Robert J. Pagan, Malcolm K. Wegener, "Life cycle assessment of Australian sugarcane products with a focus on cane processing", *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 16, No. 2, pp. 125-137, 2011.
32. 劉數隼、冷發光、李麗隼， "混凝土-輔助膠凝材料" ，中國建材工業出版社，2010。
33. Li Dongxu, Shen Jinlin, Chen Yimin, Cheng Lin and Wu Xuequan, "Study of properties on fly ash±slag complex cement" , *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, No. 9, pp. 1381-1387, 2000.
34. Halit Yazıcı, Hüseyin Yiğiter, Anıl Ş. Karabulut, Bülent Baradan, "Utilization of fly ash and ground granulated blast furnace slag as an alternative silica source in reactive powder concrete" , *Fuel*, Vol. 87, No. 12, pp. 2401-2407, 2008.
35. Kearsley, E.P. and P.J. Wainwright, "The effect of high fly ash content on the compressive strength of foamed concrete" , *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, No. 1, pp. 105-112, 2001.
36. J.I. Escalante-Garcia, L.J. Espinoza-Perez, A. Gorokhovskiy, L.Y. Gomez-Zamorano, "Coarse blast furnace slag as a cementitious material, comparative study as a partial

- replacement of Portland cement and as an alkali activated cement” , Construction and Building Materials, Vol. 23, No. 7, pp. 2511-2517, 2009.
37. CANMET/ACI. In: 8th CANMET/ACI international conference on “ fly ash, silica fume, slag, and natural Pozzolans in concrete” American Concrete Institute, pp. 963, 2004.
38. ACI Committee 234, “Guide for the use of silica fume in concrete” , Farmington Hills, MI: American Concrete Institute Report 234R-06, 2006.
39. Jack, M. and Goodale, T.C., “Rice hull utilization”, URS Research Co, Final Reprt or USDA Contract, 12-14-100-9571, 1970.
40. 林利國, “稻殼灰性質與混凝土材料上之利用”, 國立臺灣工業技術學院, 碩士論文, 1999 年。
41. Zerbino, R., G. Giaccio, “Concrete incorporating rice-husk ash without processing” , Construction and Building Materials Vol. 25, No. 1, pp. 371-378, 2011.
42. Reinhardt. G.H., “Refractory Shapes Production Lightweight Refractory Materials” , Trans. British Ceramic soc 65, 185, 1966.
43. Kasai Y, “Recent trends in recycling of concrete waste and use of recycled aggregate concrete in Japan” , recycling concrete and other materials for sustainable development, American Concrete Institute, pp. 11–33, 2004.
44. Hansen T, Lauritzen EK. “Concrete waste in a global perspective, recycling concrete and other materials for sustainable development” , American Concrete Institute, pp. 35-45, 2004.
45. ACI Committee 555, “Removal and reuse of hardened concrete” . Farmington Hills, MI: American Concrete Institute Report ACI 555R-01, 2001.
46. Hansen TC, editor, “Recycling of demolished concrete and masonry” , RILEM report 6, Chapman and Hall, 1992.
47. Fathifazl G, “ Fresh and hardened properties of recycled aggregate concrete proportioned by the equivalent mortar volume (EMV) method” . In: Proceedings of the

- 2nd Canadian conference on effective design of structures, McMaster University, 2008.
48. Jin W, Meyer C, “Baxter S. Glascrete – concrete with glass aggregate” , ACI Mater J, 2000.
49. Jin W. Alkali–silica reaction in concrete – a chemo-physico-mechanical approach. Ph.D. dissertation, Columbia University, New York; 1998.
50. Lange R, “New York City Department of Sanitation”, Personal communication, 2001.
51. Wausau Tile Company, Personal communication, Wausau (WI), Wausau Tile Company, 2005.
52. Taha MR, El-Dieb AS, Nehdi M. Recycling tire rubber in cement-based materials, concrete with recycled materials. ACI Committee 555, in preparation.
53. Dhir RK, Limbachiya MC, Paine KA, editors, “Recycling and use of used tyres” , London: Thomas Telford, 2001.
54. Brown KM, Cumming R, Morzek JR, Terrebonne P. “Scrap tire disposal: three principles for policy of choice” , Nat Resour J, Vol. 41, No. 1, pp. 9-22, 2001
55. Brodsky H., “The important role retreads can play in reducing the scrap tyre problem” , In: Dhir RK et al., editors. Recycling and use of used tyres. London: Thomas Telford, 2001.
56. Davies RW, Worthington GS, “Use of scrap tyre as a fuel in the cement manufacturing process” , In: Dhir RK et al., editors. Recycling and use of used tyres. London: Thomas Telford, 2001.
57. Navarro FJ, Partal P, Martinez-Boza F, Gallegos C. “Influence of crumb rubber concentration on the rheological behavior of crumb rubber modified bitumen” , Energ Fuel , Vol. 19, No. 5, pp. 1984-1990, 2005
58. El-Dieb AS, Abdel-Wahab MM, Abdel-Hameed ME, “Concrete using tire rubber particles as aggregate” , Recycling and use of used tyres, 2001.
59. Stockholm 1972 : REPORT OF THE UNITED NATIONS CONFERENCE ON THE HUMAN ENVIRONMENT,

<http://www.unep.org/Documents.Multilingual/Default.asp?documentid=97>

60. United Nations Conference on Environment and Development,
[http://www.eoearth.org/article/United_Nations_Conference_on_Environment_and_Development_\(UNCED\),_Rio_de_Janeiro,_Brazil](http://www.eoearth.org/article/United_Nations_Conference_on_Environment_and_Development_(UNCED),_Rio_de_Janeiro,_Brazil)
61. Executive Order 13101 “Greening the Government Through Waste Prevention, Recycling, and Federal Acquisition” Federal Register, Vol. 63, No. 179, pp. 49643-49651.1998
62. 潘智謙，“國民小學校園實質環境永續性評估之研究”，成功大學建築所碩士論，2006。
63. 龍惟定、白緯、范蕊，“區域建築能源規劃”中國建築工業出版社，2011。
64. Tommy Y. Lo and H.Z. Cui, “PROPERTIES OF GREEN LIGHTWEIGHT AGGREGATE CONCRETE” , International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology, pp.113-118, 2004.
65. Fumihiko Ohashi, Masaki Maeda, Keiichi Inukai, Masaya Suzuki and Shinji Tomura, “Study on intelligent humidity control materials: Water vapor adsorption properties of mesostructured silica derived from amorphous fumed silica” , Journal of Materials Science, Vol. 34, No. 6, pp.1341-13461, 1999.
66. 內政部建築研究所，“高性能保水調濕水泥質材料之研發”內政部建築研究所委託研究報告，2008。
67. ACI committee 201, “Guide to Durable Concrete” , ACI Materials Journal, Vol. 88, No. 5, pp. 544-582, 1991.
68. 洪延良，“電弧爐渣混凝土應用於透水鋪面之研究”，國立台灣海洋大學碩士論文，2009。
69. 經濟部水利署，“防災資訊服務網”。http://fhy.wra.gov.tw/Pub_Web_2011/
70. A. Moign, A. Vardelle, N.J. Themelis and J.G. Legoux, “Life cycle assessment of using powder and liquid precursors in plasma spraying: The case of yttria-stabilized zirconia” , Surface and Coatings Technology, Vol. 205, NO. 2, pp. 668-673, 2010.

71. J. Dufour, D.P. Serrano, J.L. Gálvez, J. Moreno and C. García, “Life cycle assessment of processes for hydrogen production. Environmental feasibility and reduction of greenhouse gases emissions”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 34, No.3, pp. 1370-1376, 2009.
72. Mohamed El-Sayed Mohamed Mahgoub, Nico Peter van der Steen, Khaled Abu-Zeid and Kala Vairavamoorthy, “Towards sustainability in urban water: a life cycle analysis of the urban water system of Alexandria City, Egypt” , *Journal of Cleaner Production* Vol.18, No, 10-11, pp. 1100-1106, 2010.
73. Subramanian Senthilkannan Muthu, Y. Li, J.Y. Hu and P.Y. Mok, “Carbon footprint of shopping (grocery) bags in China, Hong Kong and India” , *Atmospheric Environment*, Vol. 45, No. 2, pp. 469-475, 2011.
74. A. Monaco and U. Di Matteo, “Life cycle analysis and cost of a molten carbonate fuel cell prototype” , *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 36, No. 13, pp. 8103-8111, 2011.
75. 行政院公共工程委員會, “施工綱要規範”, 第 03310 章 結構用混凝土, 3.3.2 抗壓強度試驗。 <http://pcces.archknowledge.com/csinew/>

永續混凝土材料之實驗開發與應用研究

出版機關：內政部建築研究所

電話：(02) 89127890

地址：新北市新店區北新路三段 200 號 13 樓

網址：<http://www.abri.gov.tw>

編者：黃 然、陳君弢、張建智、蔡嘉榮

出版年月：100 年 12 月

版次：第一版

ISBN：978-986-03-1001-6 (平裝)